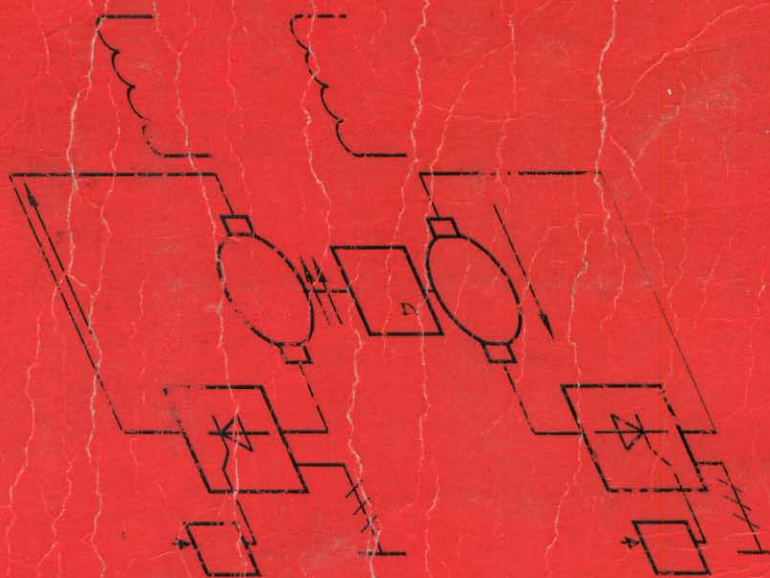


Т.В.Величко, Д.И.Родькин

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Часть 1

МЕХАНИКА И ХАРАКТЕРИСТИКИ
ДВИГАТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ



Кременчуг КГПИ 1999

Министерство образования Украины
Криворожский технический университет
Кременчугский государственный политехнический
институт

Т.В.Величко, Д.И.Родькин

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Часть 1

Рекомендовано Министерством образования Украины
как учебное пособие для студентов специальности 7.092203

"Электромеханические системы автоматизации и
электропривод"

Кременчуг КГПИ 1999

УДК 621.313 (075.8)

Т.В.Величко, Д.И.Родькин Теория электропривода. Часть 1. Механика и характеристики двигателей в электроприводе./ Учебное пособие. - Кременчуг: КПИИ, 1999. - 237 с.

Учебное пособие в трех частях: механика и характеристики двигателей в электроприводе; системы вентильных электроприводов, регулирование координат и переходные процессы; энергосбережение в системах электропривода посвящено изложению вопросов теории электропривода.

Первая часть посвящена механике и характеристикам двигателей в электроприводе.

Учебное пособие рекомендуется для студентов обучающихся по специальности 7.092203 "Электромеханические системы автоматизации и электропривод".

Ил. 237, Библ. 13 назв.

Рецензенты: д-р., проф. Кляпиков В.Б.,
д-р., проф. Чермалых В.М.

ISBN 966-95391-3-9

© Д.И.Родькин, Т.В.Величко, 1999
© П.П.Щербатых А.В., 1999

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разнообразные технологические процессы осуществляются производственными устройствами, машинами и комплексами с использованием систем электропривода, которые посредством преобразования и передачи энергии рабочей машине или исполнительному органу обеспечивают целенаправленную работу последних.

Основные теоретические положения и законы, характеризующие структуру, работу и проектирование электроприводов (ЭП), изучает курс "Теория электропривода" (ТЭП). Основными задачами курса ТЭП являются изучение сущности, структуры и принципа работы ЭП, его назначения и функциональных возможностей; особенностей и индивидуальных свойств различных систем электропривода и способов получения этих свойств; установление связи ЭП с рабочей машиной (РМ) и источником энергии; особенностей энергообменных процессов в ЭП, составляющих сущность его работы, способов управления этими процессами и пр.

Курс "Теория электропривода" является в этом отношении фундаментальным и позволяет овладеть знаниями, необходимыми для решения ряда задач, среди которых важнейшими являются анализ систем электропривода, и по сути, охватывает все вопросы, связанные с ЭП, от начала проектирования до стадии эксплуатации и ремонта.

Если в курсе "Электрические машины" изучают устройство, принципы работы и физические процессы, происходящие в электромеханических преобразователях, то курс ТЭП рассматривает электрические машины с точки зрения их функциональных возможностей, применения и использования в различных системах электропривода, изучает их характеристики и рабочие режимы, определяет связь с другими системами и, наконец, позволяет овладеть методикой их по рационального выбора его элементов.

Изучаемая дисциплина динамично развивается в связи с интенсивным совершенствованием систем электропривода, методов и средств управления им. Существенный прогресс наблюдается в следствие начала эффективного использования электрической энергии в связи с началом массового применения преобразовательной техники четвертого поколения - запираемых тиристоров и силовых транзисторов. Преобразовательные системы на их базе позволяют не только реализовать совершенные законы управления, но и качественно по иному решить задачу эффективного энергопотребления, энергоиспользования и энергоуправления.

Это обстоятельство привело к необходимости рассматривать курс «Теории электропривода» состоящим из трех частей:

- механика и характеристики двигателей в электроприводе;

- системы вентильных электроприводов, регулирование координат и переходные процессы;
- энергосбережение в системах электропривода.

В соответствии с этим, настоящее пособие по курсу подготовлено в виде трех отдельных частей. Первая часть подготовлена старшим преподавателем кафедры автоматизированного электропривода Криворожского технического университета Т.В.Величко, дополнена и отредактирована профессором Д.И.Родькиным, вторая часть - совместно Т.В.Величко и доцентом кафедры системы автоматического управления и электропривод Кременчугского государственного политехнического института А.П.Черным, третья - профессором кафедры автоматические системы управления и электропривод Кременчугского государственного политехнического института Д.И.Родькиным совместно с Т.В.Величко и А.П.Черным.

Глава I

Общие понятия об электроприводе

1.1. Эволюция электропривода и его место в народном хозяйстве

Эволюция привода охватывает длительный промежуток времени. До появления электрического привода для приведения в движение рабочих органов машин-орудий применялась мускульная сила человека и животных (ручной привод появился еще на заре человеческого общества, когда наши предки, например, вручную добывали огонь). Значительно позже в качестве двигателей стали использовать механический привод от ветряного двигателя или водяного колеса. Этот тип привода (от ветродвигателей и гидроколеса), как и ручной привод, не могли обеспечить потребностей производства даже в самый ранний период промышленного развития. Кроме того, эти виды привода требуют специальных условий для их использования (ветродвигатель может работать только в ветреную погоду; гидравлические двигатели устанавливаются только на реках с определенным перепадом и требуют сооружения плотин).

Изобретение паровой машины И.И. Ползуновым в 1763 году и Д. Уаттом в 1784 году положило начало развитию и использованию парового привода. Несколько позднее появился двигатель внутреннего сгорания, нашедший широкое применение в транспорте и морских судах. Однако и этот вид привода не являлся совершенным. Во-первых, работа паровых двигателей или двигателей внутреннего сгорания возможна только при наличии топливных ресурсов, причем в мощных приводах расход топлива велик, что на сегодняшний день, ввиду его дефицита и соответственно высокой стоимости, делает такой привод неэкономичным. Во-вторых, экологическая обстановка на сегодняшний день требует создания таких приводов, которые обеспечивали бы сохранение чистой атмосферы и окружающей среды в целом. При этом, без сомнения, наиболее экономичным и экологически чистым "топливом" является электрическая энергия.

Первый электрический привод был создан русским ученым В.С. Якоби в 1834-1838 гг. Это был электропривод речного катера, оборудованного электрическим двигателем постоянного тока и позволявшего перевозить 10-12 человек со скоростью 3-4 км/час против течения реки. Следующим этапом в развитии электропривода следует считать создание инженером Б.И. Чиколевым в 1882 году электропривода швейной машины, а чуть позднее (1886г) - электропривода вентилятора.

Однако отсутствие экономичных источников электрической энергии в то время еще не позволяло внедрить ЭП в промышленность. Практически

до конца 70-х годов прошлого столетия, несмотря на успехи, достигнутые в области конструирования электрических двигателей постоянного тока. ЭП на их основе практически не использовался. И только с изобретением трехфазного переменного тока, позволившим решить проблемы централизованного производства и распределения электрической энергии переменного тока, стало возможным создание многофазных электрических двигателей и электроприводов на их основе. С этого времени ЭП начал интенсивно использоваться в промышленности. Значительное место в практических разработках систем электропривода, в создании науки об электроприводе принадлежит ученым России.

Решение социальных и экономических задач нашего общества на современном этапе невозможно без полной электрификации всех отраслей народного хозяйства, которая предусматривает, прежде всего, автоматизацию и комплексную механизацию производственных и технологических процессов. При этом важнейшая роль в реализации этих задач принадлежит электрическому приводу, который в настоящее время является основным видом привода самых разнообразных производственных и транспортных механизмов, различных устройств водо- и газоснабжения, бытовых приборов, средств телевизионной и космической техники, медицинской аппаратуры и т.д. В настоящее время более 80% всей вырабатываемой электрической энергии потребляется ЭП. В ведущих отраслях промышленности (металлургической, машиностроительной, горнодобывающей и ряде других) коэффициент электрификации (т.е. отношение установленной мощности электрических двигателей к общей установленной мощности двигателей всех видов) в настоящее время приближается к 100%.

Главенствующее место ЭП среди других возможных видов приводов определяется целым рядом факторов, среди которых основными являются:

- простота выработки и распределения электрической энергии, используемой для питания ЭП, легкость ее преобразования в другие виды энергии;
- возможность изготовления двигателей на различные мощности и скорости вращения (диапазон мощностей современного ЭП колеблется от сотых долей ватта до десятков тысяч киловатт, а пределы скорости вращения от долей оборота вала в минуту до нескольких сотен тысяч оборотов в минуту);
- возможность создания ЭП для работы в самых разнообразных условиях (в условиях космического пространства, агрессивных сред, при низких и высоких температурах, под давлением и т.д.);
- разнообразие конструктивного исполнения, позволяющее осуществлять рациональное сочленение двигателя с рабочей машиной;
- возможность с помощью простых средств реализовать в ЭП сложные и разнообразные виды движения исполнительных органов, изменять его

параметры (скорость, ускорение);

- доступность автоматизации производственных и технологических процессов за счет применения автоматизированного ЭП;
- высокий КПД, надежность в эксплуатации, простота обслуживания, отсутствие загрязнения окружающей среды.

В сочетании с различными средствами вычислительной техники, микроэлектротехники, полупроводниковой техники, микропроцессорными устройствами и другими элементами ЭП представляет собой основное средство автоматизации и комплексной механизации всех отраслей народного хозяйства. Электроприводу, в настоящее время, альтернативы нет, его развитие и совершенствование определяют во многом развитие и облик цивилизации третьего тысячелетия.

1.2. Структура электромеханической системы и электрического привода

Обратимся к технической терминологии современных стандартов.

В соответствии с определением стандарта *электропривод это электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением.*

Для выполнения этих функций ЭП вырабатывает механическую энергию, преобразовывая электрическую энергию, получаемую им от источника (сети электрического снабжения, или автономного источника).

Вырабатываемая ЭП механическая энергия передается исполнительным органам рабочих машин и при необходимости регулируется в соответствии с требованиями технологического процесса. За счет этой энергии исполнительный орган совершает требуемое механическое движение (приводится в движение), обеспечивая выполнение производственных и технологических операций (перемещение грузов подъемными механизмами, обработку деталей на станках, подачу воздуха вентилятором и т.д.).

В процессе работы возможен и обратный порядок преобразования энергии, когда ЭП превращается в преобразователь механической энергии в электрическую. Таким образом, можно дать определение назначения ЭП.

ЭП предназначен для осуществления управляемого процесса взаимного преобразования энергии (электрической в механическую и наоборот) с целью приведения в движение исполнительного органа рабочей машины или обеспечения движения привода за счет рабочей машины.

Структурная схема современного автоматизированного ЭП представлена на рис. 1.1.

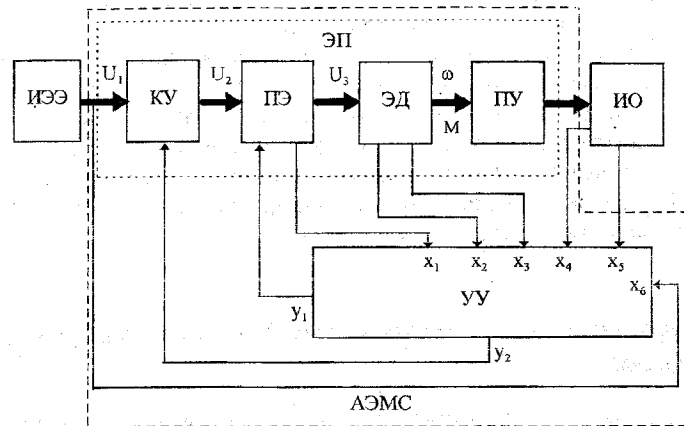


Рис.1.1. Структурная схема автоматизированного электропривода.

На схеме использованы следующие обозначения: ИЭЭ - источник электрической энергии;

КУ - коммутирующий аппарат (устройство), выполняющий функции коммутации, защиты и др.;

ПЭ.- преобразователь энергии, применяемый для преобразования и регулирования параметров электрической энергии, поступающей от источника ИЭЭ к двигателю;

ЭД (или ЭМП) - электродвигательное устройство (или, другими словами электромеханический преобразователь электрической энергии в механическую или наоборот). ЭД можно представить в виде двух элементов: непосредственно электромеханического преобразователя, преобразующего электрическую энергию в механическую, и механического элемента (движущаяся часть двигателя), представленного массой ротора с воздействующим на него моментом и вращающегося с определенной скоростью;

ПУ- механическое передаточное устройство, которое служит для согласования движения электрического двигателя и исполнительного органа рабочей машины и обеспечивает изменение параметров, вырабатываемой ЭД механической энергии. В качестве ПУ могут использоваться различные виды передач (редукторные, ременные и кривошипно-шатунные). В ряде случаев ПУ может отсутствовать, и электрический двигатель непосредственно сочленяется с исполнительным органом ИО;

ИО- исполнительный орган рабочей машины (рабочая машина).

УУ- устройство управления, с помощью которого осуществляется управление процессом преобразования энергии. Оно вырабатывает управляющий сигнал в функции задающего и различных дополнительных сигналов, содержащих информацию о процессе преобразования энергии, реальных параметрах механического движения ЭД и ИО и т.д. Использование этих сигналов позволит получить требуемые характеристики движения ЭП, оптимизировать режим работы производственного механизма, обеспечить защиту и блокировки при работе ЭП. Сигналы вырабатываются специальными датчиками.

Преобразовательное и управляющее устройства образуют систему управления СУ, которая вместе с обмотками двигателя (ЭМП) составляет электрическую часть привода.

В электроприводе можно выделить два основных канала: *силовой* и *информационный* (на схеме силовой канал показан жирными стрелками, а информационный - тонкими). По силовому каналу передается преобразуемая электроэнергия. По информационному каналу осуществляется управление процессом ее преобразования, а также производится сбор информации о состоянии системы, диагностика ее неисправностей и т.д.

В свою очередь, в силовом канале можно выделить две части - электрическую и механическую. Обязательным элементом силового канала является электромеханический преобразователь (ЭД). По существующей терминологии собственно электропривод с системой управления образуют автоматизированную электромеханическую систему АЭМС.

Исходя из структуры ЭП, последний может быть определен как *электромеханическая система, состоящая из электрических и механических элементов, предназначенная для осуществления управляемого процесса взаимного преобразования электрической энергии в механическую и передачи ее исполнительному органу рабочей машины для приведения его в движение.*

1.3. Классификация электроприводов

В зависимости от наличия тех или иных элементов в системе ЭП, их конструктивного исполнения, вида движения, обеспечиваемого ЭП, рода тока, используемого для питания двигателя, способа распределения механической энергии и т.д. существующие системы ЭП можно классифицировать следующим образом.

По роду тока приводного двигателя:

- электропривод постоянного тока;
- электропривод переменного тока.

По способу распределения механической энергии:

- групповой электропривод;
- индивидуальный (одиночный) ЭП;
- взаимосвязанный ЭП.

Групповой электропривод обеспечивает движение исполнительных органов нескольких рабочих машин или нескольких исполнительных органов рабочей машины. Передача механической энергии и ее распределение производится с помощью трансмиссии. Вследствие своего технического несовершенства трансмиссионный ЭП в настоящее время почти не применяется (рис.1.2).

Индивидуальный электропривод - это электропривод, в котором каждый рабочий орган машины приводится в движение самостоятельным электродвигателем. Здесь рабочие органы машины оказываются уже не связанными друг с другом, и поэтому значительно упрощаются механические передачи. В некоторых случаях в результате полного исключения механических передач удастся существенно повысить точность работы машины.

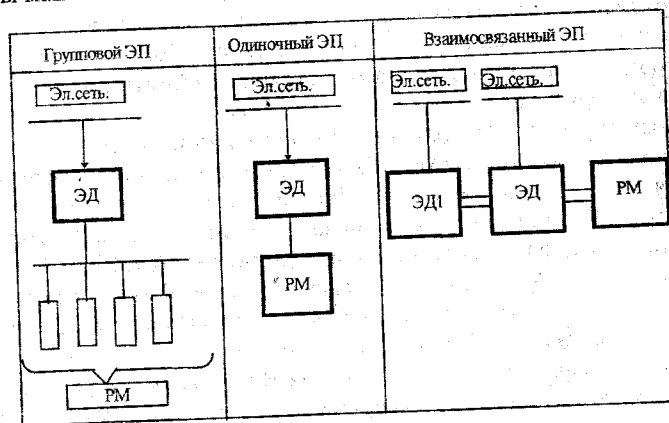


Рис. 1.2. Классификация электроприводов по способу распределения механической энергии

Индивидуальный электропривод позволяет обеспечить оптимальный режим работы машины. Наконец, при использовании индивидуального электропривода создаются наиболее благоприятные условия для автоматизации работы машины и технологических процессов. Индивидуальный ЭП широко применяется в различных современных машинах, например, в сложных металлорежущих станках, прокатных станах металлургического производства, в подъемно-транспортных машинах, экскаваторах, роботах-манипуляторах и т.п.

Взаимосвязанный электропривод содержит два или несколько

электрически или механически связанных между собой электродвигательных устройства (или электропривода), при работе которых поддерживается заданное соотношение или равенство скоростей или нагрузок, или положения исполнительных органов рабочих машин. Взаимосвязанный электропривод широко применяется в различных современных машинах и агрегатах, например, в копирующих, металлорежущих станках и станках с программным управлением, в бумагоделательных машинах, ротационных машинах полиграфического производства, в текстильных агрегатах, в прокатных станах металлургического производства, в поточных технологических линиях по производству шинного корда, синтетических пленок и т.д. Одной из разновидностей взаимосвязанного ЭП является *многодвигательный ЭП* - это электропривод, двигательное устройство которого совместно работает на общую нагрузку. Примером может служить привод платформы механизма поворота мощного экскаватора.

По виду движения электроприводы могут обеспечить: вращательное однонаправленное движение, вращательное реверсивное и поступательно-реверсивное движение. Поступательное движение может быть получено путем использования электродвигателя вращательного движения обычного исполнения совместно с преобразовательным механизмом (кулисным, винтовым, реечным и т.п.), либо путем применения электродвигателя специального исполнения для поступательного движения (т.н. линейные электродвигатели, магнитогидродинамические двигатели и др.).

По степени управляемости электропривод может быть:

- *нерегулируемым* - обеспечивая движение исполнительного органа рабочей машины с одной рабочей скоростью; параметры привода при этом изменяются только в результате возмущающих воздействий;

- *регулируемым* - обеспечивая различные скорости исполнительного органа машины; параметры привода могут изменяться под воздействием управляющего устройства;

- *программно-управляемым* - управляемый в соответствии с заданной программой;

- *следящим* - автоматически отрабатывающим движение исполнительного органа рабочей машины с определенной точностью в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом;

- *адаптивным* - автоматически избирающим структуру или параметры системы управления при изменении условий работы машины с целью выработки оптимального режима.

По роду передаточного устройства различают электропривод:

- *редукторный* - в котором электродвигатель передает вращательное движение передаточному устройству, содержащему редуктор;

- *безредукторный* - в котором осуществляется передача движения от электродвигателя либо непосредственно рабочему органу, либо через

передаточное устройство, не содержащее редуктор.

По уровню автоматизации различают:

- *неавтоматизированный ЭП* - в котором управление ручное; в настоящее время такой привод встречается редко, преимущественно в установках малой мощности бытовой и медицинской техники и т.п.;
- *автоматизированный ЭП* - управляемый путем автоматического регулирования параметров;

- *автоматический ЭП* - в котором управляющее воздействие вырабатывается автоматическим устройством без участия оператора.

Современный ЭП является главным потребителем электроэнергии. Для обеспечения растущих потребностей человечества созданы, и продолжают создаваться и совершенствоваться сотни тысяч рабочих машин, производственных и бытовых механизмов, подъемно-транспортных средств на основе различных систем как нерегулируемого, так и регулируемого ЭП.

В многоплановом развитии современного ЭП основную роль играют *общие требования*, предъявляемые к ЭП:

- надежность, заключающаяся в способности объекта выполнять свои функции в течение определенного промежутка времени;
- точность, состоящая в способности системы реализовать заданный технологический процесс;
- энергетическая эффективность, определяемая КПД, величиной потерь и потребляемой мощностью;
- ресурсоёмкость - этот показатель учитывает стоимость материалов, заложенных в конструкцию ЭП, трудоемкость при монтаже, наладке, эксплуатации (оценивается этот показатель ценой ЭП).

Основные требования к ЭП в качественном отношении определяются характером технологического процесса. Проектирование ЭП, выбор его элементов всегда начинается с изучения технологического процесса и установления конкретных требований, предъявляемых технологией.

1.4. Основные проблемы и направления развития электропривода

Говоря о проблемах современного ЭП прежде всего следует отметить, что наиболее важными из них являются:

- расширение функциональных возможностей ЭП в различных технологических применениях;
- повышение энергетической эффективности ЭП, в связи со все более и более усугубляющимся энергетическим кризисом как в стране, так и в мире;
- снижение материалоемкости конструкции ЭП, связанное с дефицитом и дороговизной различных материалов (цветных металлов, драгоценных металлов, изоляционных материалов) и, кроме того, с

потребностью уменьшения габаритов.

Основным направлением развития современного электропривода является расширение области применения регулируемого электропривода, причем, в основном, привода переменного тока. Использование регулируемого ЭП позволяет наиболее полно реализовать функции управления, защиты, автоматизации производственных процессов. Именно поэтому расширение области применения регулируемого электропривода характерно для всех стран мира. В настоящее время регулируемый ЭП в общем объеме электроприводов составляет 8 - 10%, а к 2000 году должен будет составить уже 20%. В этой области сосредоточено около 95% всех исследовательских разработок в области электропривода.

Рассматривая основные тенденции развития ЭП можно выделить следующие.

Расширение области применения ЭП вообще. Это означает, что имеется тенденция к расширению сферы использования ЭП. Сферы, где в настоящее время ЭП широко завоевывает свои позиции - это медицина (ЭП разнообразных протезов, инвалидных колясок, ЭП разнообразного технологического операционного оборудования); бытовой ЭП (ЭП с микропроцессорным управлением по подготовке и переработке продуктов, всевозможные робототехнические комплексы по подготовке пищи, уборке помещений и т.п.); ЭП в сельском хозяйстве (ЭП разнообразных механизмов и машин по первичной или полной переработке сельскохозяйственной продукции, ЭП птицефабрик, животноводческих ферм и т.п.).

Расширение диапазона мощностей применяемых электродвигателей. Максимальная мощность выпускаемых электрических машин: двигателей постоянного тока - 12000 кВт, двигателей переменного тока - 60000 кВт. Минимальная мощность - 0,1 Вт и менее.

Расширение диапазона скоростей вращения применяемых машин. В настоящее время достигнуты скорости вращения вала двигателя, составляющие 150-350 тыс.об/мин. (бесколлекторные машины постоянного тока с магнитной подвеской вместо традиционных подшипников). Область применения таких машин - химическая промышленность; установки по обогащению урана и других материалов; привод металлообрабатывающих (шлифовальных) станков. Низкоскоростные машины с угловой скоростью несколько оборотов в минуту применяют в приводах различных технологических установок; приводах мельниц, приводах прокатных станов ($n=60-80$ об/мин).

Расширение области применения ЭП на базе машин переменного тока. Передовые фирмы и коллективы, выпускающие регулируемый ЭП, в настоящее время, в основном, ориентируются на постепенное сужение сферы применения привода постоянного тока и расширение применения привода переменного тока. В 1991 году в развитых капиталистических

странах привод постоянного тока составил 48%, а ЭП переменного тока 52% от общего числа регулируемых ЭП. Но уже к 2000 году это соотношение изменится в сторону увеличения применения ЭП переменного тока - до 72% и уменьшения применения ЭП постоянного тока - до 28% от общего числа регулируемых автоматизированных ЭП.

Наблюдается тенденция к использованию бесколлекторного привода постоянного тока.

Ярко просматривается тенденция к применению электрических машин нетрадиционных типов: бесколлекторных МПТ (вентильные двигатели); электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов; линейных машин; дугостаторных машин.

Применение в ЭП сверхпроводящих материалов, т.е. создание электрических машин, КПД которых находится на уровне 0,99...0,992. Это достигается за счет снижения активного сопротивления путем использования сверхпроводящих материалов и систем в обмотках машин.

Широкое использование в практике ЭП вычислительной техники для получения режимов, близких к оптимальным (построение оптимальных систем, адаптивных систем управления, самонастраивающихся систем, систем, наделенных интеллектом). При этом используются микропроцессорные системы управления, системы управления со встроенным ЭВМ. Количество таких разработок исчисляется десятками и сотнями тысяч. Промышленностью выпускаются самые разнообразные системы управления.

Широкое применение полупроводниковой техники, причем, не только для регулирования напряжения и частоты, но и для выполнения коммутационных функций. Это позволит отказаться от механических коммутационных устройств и аппаратов.

Применение новых полупроводниковых материалов для радикального улучшения энергетических показателей ЭП: широкое применение запираемых (двухоперационных) тиристоров и силовых транзисторов. Широкое применение таких приборов позволит решить проблему реактивной мощности. Это снизит токовую нагрузку в сетях, позволит отказаться от установки конденсаторных батарей, синхронных компенсаторов и др.

Применение интегрированных интеллектуальных полупроводниковых модулей на основе силовых транзисторов, отличающихся своими высокими энергетическими и управляющими характеристиками и свойствами, причем существенная часть устройств и систем управления располагается на одной (совместно с силовыми модулями) структуре.

Глава 2

Механика и преобразование энергии в электроприводе

2.1. Основные положения механики электропривода

Основным видом современного промышленного электропривода является индивидуальный (однодвигательный) привод, поэтому вопросы механики электропривода будут рассматриваться для однодвигательного ЭП.

В соответствии с определением в структуру механической части ЭП (рис.2.1.) входят:

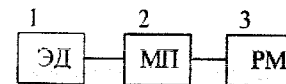


Рис. 2.1. Кинематическая схема механической части ЭП

1 - подвижная часть электрического двигателя (ротор), 2 - механическая передача, 3- рабочая машина (или рабочий орган). В общем случае количество передач может быть различным, а в тех случаях, когда рабочий орган должен двигаться поступательно, в механическую часть привода входят механические преобразователи, преобразующие вращательное движение в поступательное.

В некоторых случаях кинематическая цепь может быть значительно проще. В ней могут отсутствовать либо передачи, либо преобразовательные механизмы, либо и те, и другие, одновременно.

Иногда вал ЭД непосредственно соединяется с рабочим органом, либо ЭД объединяется с рабочим органом в одно целое.

В качестве передач наиболее часто применяют зубчатые, клиноременные передачи или карданный вал; режущие или червячные передачи.

В тех случаях, когда рабочий орган должен находиться в возвратно-поступательном движении, применяют преобразовательные механизмы различного вида: барабан и трос; зубчато-реечный преобразователь, кривошипный механизм, винт с гайкой, шарнирно-рычажный механизм и т.п.

Примеры механических передач приведены на рис. 2.2, где:

- а - редуктор (зубчатая передача);
- б - зубчато-реечный механизм;
- в - барабан-канат;
- г - кривошипно-шатунный механизм.

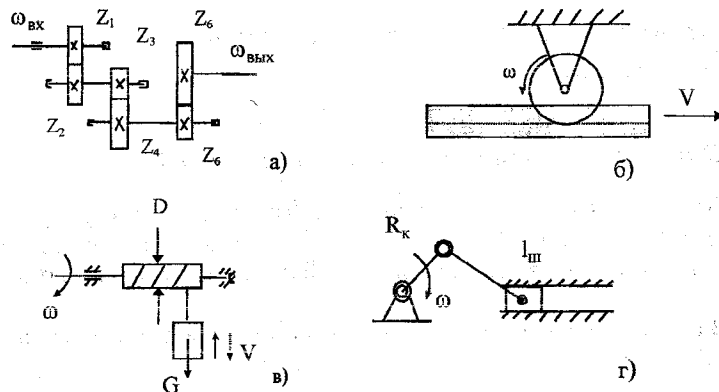


Рис. 2.2. Механические передачи в электроприводе

В общем случае, *механическая часть ЭП представляет собой несколько элементов на которые воздействуют усилия или вращающие моменты и совершающих различные виды движений*.

Движение отдельных масс может быть описано с помощью пространственных координат и их производных (например, процесс прямолинейного движения тела может быть описан с помощью 2-го закона Ньютона).

Моменты и усилия, создаваемые механической частью привода, можно разделить на *движущие моменты и моменты сопротивления*. Движущий (вращающий) момент создается двигателем (это момент на валу ротора). Момент сопротивления (момент статический, или момент нагрузки) создается технологической нагрузкой. Статический момент состоит из двух составляющих: обусловленной технологической нагрузкой и составляющая обусловленная силами трения.

По своему характеру статические моменты делят на *активные и реактивные*.

Реактивный момент сопротивления появляется только вследствие движения - это реакция механического звена ЭП на движение.

Реактивный момент создается силами реакции среды на движущееся тело. Примером реактивного момента является момент трения. Реактивный момент *всегда направлен против движения* (т.е. имеет знак, противоположный знаку скорости). При изменении направления вращения знак реактивного момента изменяется. Элемент, создающий реактивный момент может быть только потребителем энергии.

Активный момент сопротивления появляется независимо от движения электропривода и создается посторонним источником механической

энергии (например, весом поднимаемого или опускаемого груза; силой ветра, и т.д.). *Направление активного момента не зависит от направления вращения, т.е. знак активного момента не связан со знаком угловой скорости*. При изменении направления вращения знак активного момента не изменяется. Источник активного момента может как потреблять, так и отдавать энергию.

На рис.2.3. приведены графики активного и реактивного моментов:

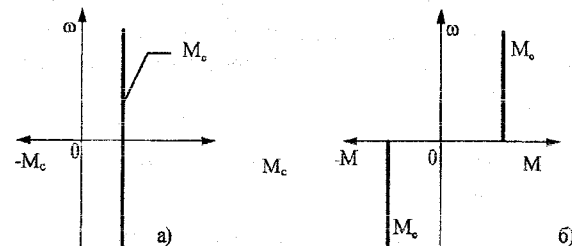


Рис. 2.3. Графики моментов сопротивления

а) - активный момент сопротивления; б) - реактивный момент сопротивления

2.2. Уравнение движения электропривода

Движение ЭП обусловлено взаимодействием момента, развиваемого двигателем, и момента сопротивления (причем, момент сопротивления, в зависимости от его характера, может как способствовать, так и препятствовать движению). При этом ЭП может работать в различных режимах: *установившемся (статическом)* с постоянной скоростью, либо в *динамическом (переходном)* режиме, которому соответствует состояние ускорения или замедления привода, вызванные целым рядом причин (например, колебаниями механической нагрузки вследствие изменения технологических параметров, включением и выключением пусковых или тормозных сопротивлений, изменением питающего напряжения или других параметров самого электропривода).

Всякое нарушение установившейся скорости ЭП, являющегося сложной системой, сопровождается изменением запаса кинетической энергии в системе "двигатель - рабочая машина", что влияет на поведение электродвигателя, вызывая изменение развиваемого им момента, мощности, скорости вращения.

Исследование характера движения привода или его отдельных органов может быть произведено с помощью *уравнения движения ЭП, которое учитывает взаимодействие всех усилий и моментов в системе в любой момент времени*.

Уравнение движения электропривода может быть получено на основе уравнения энергетического баланса системы двигатель-рабочая машина. В соответствии с основным назначением электропривод осуществляет преобразование электрической энергии в механическую и ее передачу исполнительному органу рабочей машины для совершения полезной работы.

При этом из всей энергии W_ϕ , передаваемой двигателем, одна часть ее W_c затрачивается на преодоление сил сопротивления движению, а другая часть $W_{дин}$ - на изменение запаса кинетической энергии движущихся частей системы. Уравнение энергетического баланса имеет вид:

$$W = W_c + W_{дин}. \quad (2.1)$$

Переходя к уравнению баланса мощностей, можно записать

$$P_\phi = P_c + P_{дин}, \quad (2.2)$$

где P_ϕ - мощность развиваемая двигателем; P_c - мощность, затрачиваемая на преодоление полезных и вредных сопротивлений в системе; $P_{дин}$ - динамическая мощность, характеризующая изменение кинетической энергии системы.

Из курса теоретической механики известно, что запас кинетической энергии системы, вращающейся с угловой скоростью ω , равен:

$$W_k = J \frac{\omega^2}{2}, \quad (2.3)$$

где J - момент инерции системы.

Моментом инерции называется мера инерции тела во вращательном движении. Момент инерции зависит от массы вращающегося тела и расстояния от оси вращения и может быть определен из выражения:

$$J = mr^2. \quad (2.4)$$

Момент инерции не зависит ни от угловой скорости, ни от величины приложенных моментов.

В подавляющем большинстве на практике приходится иметь дело с системами, обладающими неизменным по величине моментом инерции ($J = const$). Однако, есть категория машин, у которых момент инерции является функцией угла поворота. Поэтому в общем случае будем считать, что $J = f(\alpha)$, где α - угол поворота.

Определим значение динамической мощности $P_{дин}$ как производной от запаса кинетической энергии A_k по времени:

$$P_{дин} = \frac{dW_k}{dt} = \frac{dJ}{dt} \frac{\omega^2}{2} = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (2.5)$$

Подставляя значение $P_{дин}$ в выражение баланса мощностей, получим:

$$P_\phi - P_c = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (2.6)$$

Разделив это выражение на ω , получим уравнение движения системы (или, как его еще называют, уравнение моментов, отнесенное к валу, вращающемуся со скоростью ω):

$$M_\phi - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (2.7)$$

Т.к. угловая скорость вращения - это производная от угла поворота по времени ($\omega = \frac{d\alpha}{dt}$), то уравнение моментов можно записать и в таком виде:

$$M_\phi - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}, \quad (2.8)$$

причем закон изменения $J = f(\alpha)$, как правило, известен.

Правая часть уравнения представляет собой выражение для динамического момента, который возникает только в переходном режиме, когда $\frac{d\omega}{dt} \neq 0$; $\frac{dJ}{d\alpha} \neq 0$.

$$M_\phi - M_c = M_{дин}, \quad (2.9)$$

где $M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}$

Динамический момент обусловлен как изменением скорости движения, так и изменением кинетической энергии системы вследствие изменения момента инерции (примером систем ЭП с переменным моментом инерции могут быть, например, кривошипные механизмы различных прессов, подъемно-качающихся столов прокатных станков и др.).

Чаще всего в практике имеет место случай, когда $J = const$. В этом случае уравнение движения привода приобретает вид:

$$M_\phi - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.10)$$

или

$$M_\phi - M_c = M_{дин}.$$

В общем случае, знаки моментов, входящих в уравнение движения, могут быть различными, что необходимо учитывать при конкретном математическом описании.

Вращающий момент M_ϕ , развиваемый двигателем при работе, принимается положительным, если он направлен в сторону движения привода. Если же он направлен в обратную движению сторону, то он считается отрицательным.

Момент сопротивления M_c считается положительным, если он оказывает тормозящее действие (этот знак имеют все реактивные M_c , а также моменты сопротивления при подъеме груза, сжатии пружины и т.п., т.е. активные моменты сопротивления в тех случаях, когда их действие оказывает препятствие движению). Во всех остальных случаях (спуск груза, растяжение пружины) момент сопротивления принимается отрицательным. Выбор знаков моментов зависит как от режима работы ЭП, так и от характера M_c . Знак динамического момента $M_{дин}$ определяется алгебраической суммой M_d и M_c .

С учетом сказанного, уравнение движения привода может быть записано в виде:

$$\pm M_d \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.11)$$

Анализ уравнения движения показывает, что оно может характеризовать систему как в статических, так и в динамических режимах, поэтому уравнение движения называют также *уравнением динамики ЭП*.

Наряду с системами, имеющими элементы, находящиеся только во вращательном движении, иногда приходится встречаться с системами, движущимися поступательно, или имеющими отдельные элементы, совершающие поступательное движение. Для поступательного движения уравнение движения можно записать в следующем виде:

$$F_d - F_c = F_{дин} = m \frac{dV}{dt}, \quad (2.12)$$

где F_d - движущая сила; F_c - сила статических сопротивлений; m - масса движущегося тела; V - линейная скорость передвижения тела.

В теории ЭП, как правило, используется уравнение движения для вращательного движения, при условии, что все поступательно движущиеся элементы специальным образом приведены к вращательному движению, что будет рассмотрено несколько позже. Кроме того, рассмотренные уравнения движения справедливы только в отношении систем, у которых механические элементы привода и рабочей машины связаны абсолютно жесткой связью. В действительности все механические элементы обладают упругими свойствами, вследствие чего в некоторых случаях возникают режимы работы, коренным образом отличающиеся от поведения абсолютно жесткой системы.

Уравнение движения позволяет решать основные задачи электропривода. Первая из них - *задача анализа системы ЭП*, заключается в определении характера движения привода при известных моментах двигателя и сопротивления. Так, выразив из уравнения движения (2.10) ускорение ε :

$$\varepsilon = \frac{M_d - M_c}{J} \quad (2.13)$$

несложно видеть, что:

- если $M_d > M_c$, то $\varepsilon > 0$, что соответствует режиму разгона в случае $\omega > 0$ или замедления, если $\omega < 0$.

- если $M_d = M_c$, то $\varepsilon = 0$ (другими словами, $M_{дин} = 0$) и имеет место установившийся (статический) режим работы с $\omega = const$.

- если $M_d < M_c$, то $\varepsilon < 0$, что соответствует режиму торможения при $\omega > 0$ и разгона при $\omega < 0$.

Интегрированием выражения $\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pm M_d \pm M_c}{J}$, можно установить закон изменения скорости

$$\omega = \int_0^t \frac{M_d - M_c}{J} dt + \omega_{нач}, \quad (2.14)$$

или время протекания переходного режима (разгона, торможения и т.д.) при изменении скорости от ω_1 до ω_2 :

$$t = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M_d - M_c} d\omega. \quad (2.15)$$

В общем случае, оба момента (M_d и M_c) являются функциями скорости.

Если принять, что движение происходит под воздействием моментов, не зависящих от скорости, то время движения ЭП при изменении скорости от ω_1 до ω_2 будет равно:

$$t = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M_d - M_c} d\omega = \frac{J(\omega_2 - \omega_1)}{M_d - M_c}. \quad (2.16)$$

В частности, если $\omega_1 = 0$, как показано на рис. 2.4.,

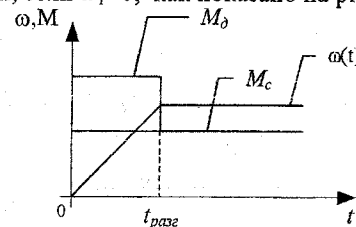


Рис. 2.4. Временные характеристики разгона привода

время пуска двигателя до определенной скорости можно определить как:

$$t_{пуска} = \frac{J\omega_2}{M_d - M_c}.$$

Для режима замедления ЭП (рис.2.5) динамический момент отрицательный, что соответствует уравнению движения вида:

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

Время торможения в соответствии с этим:

$$t_m = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M_d + M_c} d\omega = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M_d + M_c} d\omega. \quad (2.17)$$

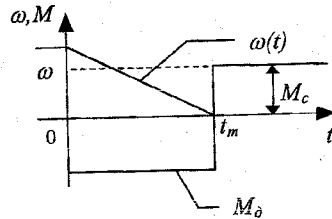


Рис. 2.5. Временные характеристики торможения привода.

В частности, если $J=const$, $M_c=const$ и $M_d=const$, то

$$t_m = \frac{J\omega_1}{M_d + M_c}.$$

Вторая задача - задача синтеза системы ЭП - позволяет определить необходимый закон изменения момента двигателя, обеспечивающий работу ЭП в соответствии с заданным законом изменения ускорения или скорости ($M_d = M_c + J\epsilon$).

Рассмотрим примеры, иллюстрирующие указанные выше положения.

Пример 1.

ЭП подъемного механизма (рис.2.6. а) работает в соответствии с заданной тахограммой движения (рис.2.6. б):

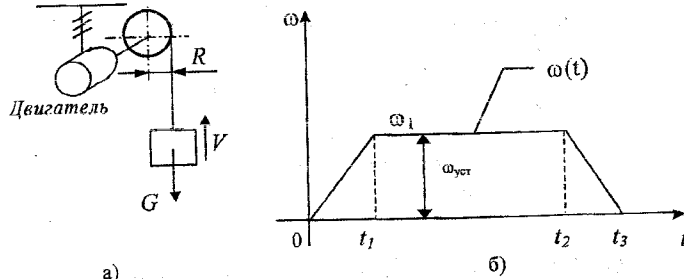


Рис. 2.6. Схема ЭП подъемного механизма (а) и тахограмма движения (б)

На рис.2.6. обозначены: G - вес груза, R - радиус барабана лебедки, V - скорость перемещения груза.

Необходимо определить:

Момент развиваемый двигателем при подъеме груза на участках t_1 , t_2 и t_3 и время подъема (на I участке):

Моменты двигателя определим следующим образом:

- на I участке: $M_d = M_c + J \frac{d\omega}{dt} = GR + J \frac{d\omega}{dt}$;
- на II участке: $M_d = M_c = GR$;
- на III участке: $M_d = M_c - J \frac{d\omega}{dt}$.

Время подъема на I участке, учитывая что $\omega_1 = \omega_{уст} = V/R$:

$$t_1 = \int_0^{\omega_1} \frac{J}{M_d - M_c} d\omega.$$

Пример 2.

Выполним анализ режимов работы грузоподъемного механизма.

Подъемный механизм (лебедка) приводится в движение двигателем постоянного тока П-81 с паспортными данными: $P_n=32$ кВт, $U_n=220$ В, $I_n=170$ А, $n_n=1500$ об/мин, $R_n=0,067$ Ом, $GD^2=2,8$ кг·м². Максимальный момент при пуске $M_{пуск}=2,2M_{ном}$, масса груза 80 кг ($G=784$ Нм), радиус барабана $R_6=0,26$ м, суммарный момент инерции системы (приведенный к валу двигателя) $J=1,7$ кг·м². Примерная тахограмма движения привода приведена на рис.2.7.

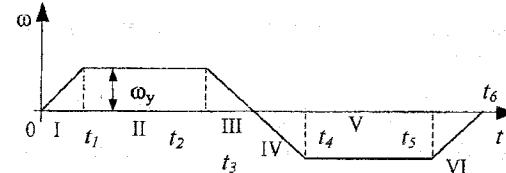


Рис. 2.7. Тахограмма движения подъемного механизма.

Требуется: выполнить анализ движения привода для всех участков тахограммы (рассмотреть все возможные режимы замедления привода на участках III и VI); определить время разгона привода до установившейся скорости на участке I и время торможения на участке III.

Режим подъема груза на участке I. В соответствии с тахограммой движения на I участке привод разгоняется. Это можно показать на основании уравнения движения.

Момент двигателя при пуске равен $2,2M_{ном}$,

где $M_n = k\Phi_n I_n$,

$$k\Phi = \frac{U_n - I_n R_n}{\omega_n} = \frac{U_n - I_n R_n}{\pi n_n} = 1,33 \text{ В} \cdot \text{с};$$

$$M_n = 1,33 \cdot 170 = 226,1 \text{ Нм};$$

$$M_{пуск} = 2,2 \cdot 226,1 = 497,4 \text{ Нм};$$

Момент создаваемый грузом (статический момент):

$$M_c = m \cdot g \cdot R_6 = 80 \cdot 9,8 = 784 \text{ Нм}.$$

Уравнение движения для участка I:

$$M_{\partial} - M_c = M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} > 0, \text{ т.к. } M_{\partial} > M_c.$$

На участке II скорость двигателя постоянна, т.е. ЭП работает в установившемся режиме

$$M_{\partial} = M_c.$$

Участку III соответствует режим замедления привода до полного останова, причем этот режим можно реализовать несколькими способами, например, при введении $R_{\text{доб}}$ в цепь якоря (рис. 2.8):

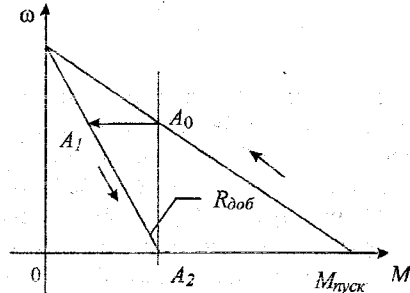


Рис. 2.8. Замедление привода при введении $R_{\text{доб}}$ в цепь якоря.

При введении $R_{\text{доб}}$ момент M_{∂} уменьшается и, согласно уравнению движения

$$M_{\partial} - M_c = J \frac{d\omega}{dt} < 0, \text{ т.к. } M_{\partial} < M_c.$$

Участок IV соответствует разгону двигателя в обратном направлении. Этот режим может быть получен также несколькими способами, например, двигатель включен "на спуск" - при этом и M_{∂} и M_c действуют согласно, благодаря чему привсд будет разгоняться, причем, достигнув скорости ω_0 , он будет продолжать увеличивать скорость за счет нагрузки (ω становится больше ω_0), что соответствует тормозному режиму, (т.е. вновь знак момента двигателя изменится на противоположный (рис.2.9):

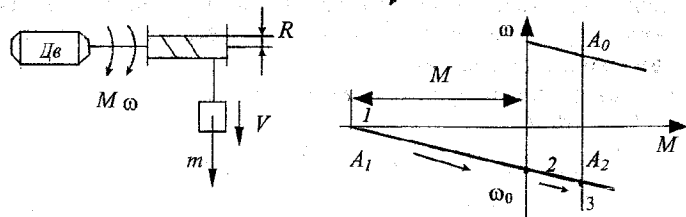


Рис. 2.9. Разгон электропривода в обратном направлении в двигательном режиме.

Таким образом, весь процесс разгона двигателя до установившейся скорости состоит из двух участков:

$$\text{т.т. 1-2 : } + M_{\partial} + M_c = J \frac{d\omega}{dt} > 0$$

$$\text{т.т. 2-3 : } - M_{\partial} + M_c = J \frac{d\omega}{dt} > 0, \text{ до } |M_{\partial}| < |M_c|.$$

В самом общем случае статический момент может быть представлен зависимостью

$$M_c = M_0 + (M_{\text{сн}} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^x,$$

где M_0 - момент холостого хода; $M_{\text{сн}}$ - номинальный статический момент; ω , ω_H - текущая и номинальная скорость; x - коэффициент, определяющий зависимость момента от скорости.

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

Рассмотренное нами ранее уравнение движения привода вида :

$$M_{\partial} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$$

где M_{∂} - момент двигателя; M_c - момент сопротивления, создаваемый нагрузкой (рабочей машиной); $J = J_{\partial} + J_{\text{рм}}$ - момент инерции системы, состоящий из моментов инерции вращающихся масс механической части, применимо к простейшим системам привода, у которых механическая часть представлена двигателем (вращающимся ротором) и рабочей машиной, соединенными непосредственно.

У большинства приводов как правило, двигатель приводит в действие производственный механизм посредством различных передач, при этом отдельные элементы привода движутся с различными скоростями. Часто в производственных механизмах одни элементы совершают вращательное движение, а другие - поступательное. При этом каждый элемент кинематической цепи обладает упругостью и деформируется под действием сил и моментов, а в соединениях элементов имеются воздушные зазоры. Таким образом, механическая часть ЭП может представлять собой многомассовую систему, имеющую весьма сложную кинематическую цепь, и расчет движения такой системы представляет, при условии учета всех перечисленных выше факторов, большие трудности (в некоторых случаях расчет такой системы возможен только с применением ЭВМ).

С учетом того, что основные закономерности движения таких систем определяются наибольшими массами и зазорами и наименьшими жесткостями связей между элементами системы, можно было бы несколько усложнить схему механической части привода приведя ее либо к трехмассовой, либо к двухмассовой механической системе с эквивалентными упругими связями и с суммарным зазором (или без него), приведенными к угловой скорости вала двигателя. Такие схемы достаточно сложны для анализа. Этот вопрос рассматривается в разделе динамики систем электропривода.

В большинстве практических случаев в инженерных расчетах, не требующих большой точности, можно пренебречь упругостью и зазорами в передачах, приняв механические связи абсолютно жесткими. При этом движение одного элемента дает полную информацию о движении всех остальных элементов, поэтому движение ЭП в целом можно рассматривать на каком-либо одном механическом элементе. Обычно в качестве такого элемента принимают вал двигателя, а реальную схему механической части системы заменяют более простой эквивалентной (расчетной) схемой.

Для электромеханической системы без учета упругих связей эквивалентная схема состоит из одного элемента. При этом фактическую скорость отдельных элементов, моменты инерции и моменты сопротивления, действующие в системе, заменяют эквивалентными величинами.

Рассмотрим построение эквивалентных схем.

Пусть механическая часть системы привода содержит несколько элементов с моментами инерции J_1 ; J_2 ; и J_3 , вращающихся с угловыми скоростями ω_1 ; ω_2 ; и ω_3 , а также элемент с массой m , движущийся поступательно со скоростью V (рис. 2.10).

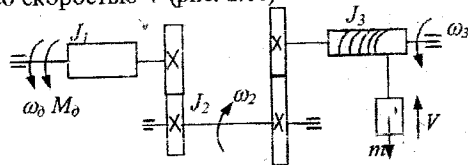


Рис. 2.10. Схема механической части системы ЭП.

Момент сопротивления зависит от веса поступательно движущегося элемента

$$G = mg, \quad (2.18)$$

который создает на валу рабочего органа (барабана с радиусом R и моментом инерции J_3):

$$M_c = G \cdot R. \quad (2.19)$$

При этом выбор эквивалентной расчетной схемы, заменяющей реальную схему, зависит от поставленной задачи расчета. Обычно цель заключается в определении движения одного из элементов системы, (как уже говорилось выше, в электроприводе в качестве этого элемента обычно принимают вал двигателя).

Эквивалентная схема для этого случая представлена на рис. 2.11.

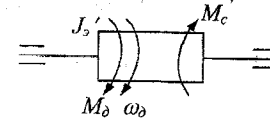


Рис. 2.11. Эквивалентная схема механической части ЭП.

Движение такой эквивалентной системы также может быть описано с помощью уравнения движения, но уже вида

$$M_\partial - M'_c = J'_3 \frac{d\omega_\partial}{dt}, \quad (2.20)$$

где J'_3 - приведенный к валу двигателя эквивалентный момент инерции; M'_c - приведенный к валу двигателя статический момент.

Определение эквивалентного момента инерции и статического момента по известным величинам для элементов реальной системы, движущихся с различными скоростями, составляет задачу построения эквивалентной расчетной схемы. Поэтому момент инерции J'_3 и статический момент M'_c называют *приведенными* или *эквивалентными*.

Приведение статических моментов и усилий выполняют на основании уравнения энергетического баланса, составленного для рабочего органа и приводного двигателя.

Например, для случая, когда оба элемента совершают вращательное движение (рис.2.12 а) эквивалентная схема показана на рис 2.12. б):

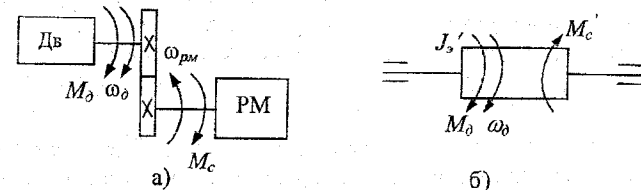


Рис. 2.12. Реальная (а) и эквивалентная (б) схемы механической части ЭП.

Уравнение энергетического баланса

$$M'_c \omega_\partial = M_\partial \omega_\partial = M_c \cdot \omega_{рм} \cdot \frac{1}{\eta_n}, \quad (2.21)$$

где $M_c \omega_{рм}$ - механическая мощность нагрузки; η_n - КПД механической передачи, учитывающий потери на трение (для одной ступени цилиндрического редуктора колеблется в пределах $\eta_n=0,95-0,98$).

Тогда момент M'_c , приведенный к валу

$$M'_c = M_\partial = \frac{M_c \omega_{рм}}{\eta_n \omega_\partial} = \frac{M_c}{i \cdot \eta_n}, \quad (2.22)$$

где $i = \frac{\omega_d}{\omega_{pm}}$ - передаточное отношение редуктора.

Если рабочий орган (РМ) совершает поступательное движение (рис. 2.13),

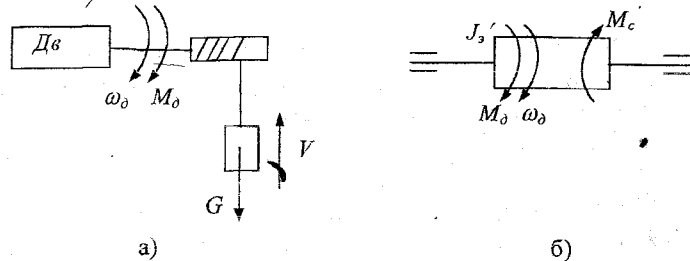


Рис. 2.13. Реальная (а) и эквивалентная (б) схемы механической части ЭП

то уравнение энергетического баланса имеет вид:

$$M_d \omega_d = M'_c \omega_d = F \cdot V \cdot \frac{1}{\eta_n}. \quad (2.23)$$

Тогда

$$M'_c = \frac{F \cdot V}{\omega_d \cdot \eta_n} = \frac{F \rho}{\eta_n}, \quad (2.24)$$

где $\rho = \frac{V}{\omega_d}$ - радиус приведения.

Иногда существует необходимость приведения вращательного движения к поступательному. В этом случае приведенное усилие может быть определено в соответствии с выражением:

$$F'_d = \frac{M_d \cdot \omega_d \cdot \eta_n}{V}. \quad (2.25)$$

Следует отметить, что зависимости для приведения статистического момента справедливы для системы, работающей в режиме потребления энергии приводом, т.е. для двигательного режима работы.

В тех случаях, когда привод работает в режиме рекуперативного торможения, т.е. за счет энергии, потребляемой со стороны нагрузки, уравнение баланса мощностей выглядит несколько иначе, а именно:

$$M_d \omega_d = M'_c \omega_d = M_{pm} \omega_{pm} \cdot \eta_n = M_c \omega_{pm} \eta_n. \quad (2.26)$$

откуда

$$M'_c = \frac{M_c \cdot \omega_{pm} \cdot \eta_n}{\omega_d} = \frac{M_c \cdot \eta}{i}, \quad (2.27)$$

или в случае поступательного движения рабочей машины

$$M'_c = \frac{F \cdot V \cdot \eta}{\omega_d} = F \rho \eta. \quad (2.28)$$

Если механическая часть ЭП содержит несколько передаточных устройств, как например привода с вентиляторной нагрузкой, показанный на рис. 2.14,

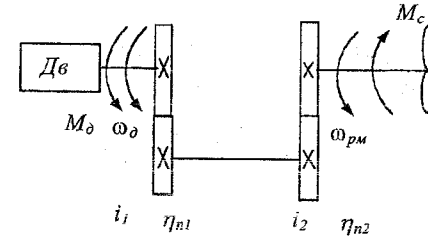


Рис. 2.14. Механическая часть ЭП с несколькими передаточными устройствами

то приведенный к валу двигателя момент определяется как

$$M'_c = \frac{M_c}{i_1 \cdot i_2 \cdot \eta_{n1} \cdot \eta_{n2}}. \quad (2.29)$$

Для оценки суммарной инерционности механической части привода выполняют приведение моментов инерции к общей оси. Приведение инерционных масс и моментов инерции к общему валу (например, валу двигателя) заключается в том, что эти массы и моменты инерции заменяются одним эквивалентным моментом инерции $J'_э$ на валу двигателя. При этом условием приведения является равенство кинетической энергии в реальной и эквивалентной схемах.

Рассмотрим, например, систему ЭП, механическая часть которой представлена следующей кинематической схемой (рис. 2.15), где (M_1 и M_2 - соединительные муфты).

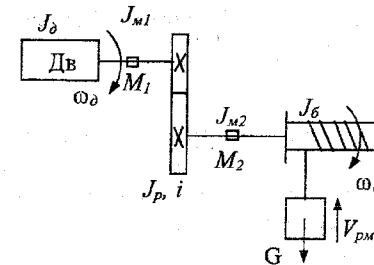


Рис. 2.15. Кинематическая схема системы ЭП

Этой схеме соответствует схема, аналогичная приведенной на рис.2.11.:

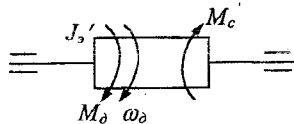


Рис. 2.16. Эквивалентная схема механической части.

Запас кинетической энергии в реальной системе:

$$W_k = \frac{J_{\partial} \omega_{\partial}^2}{2} + \frac{J_{M1} \omega_{\partial}^2}{2} + \frac{J_p \omega_{\partial}^2}{2} + \frac{J_{M2} \omega_{\partial}^2}{2} + \frac{m V_{PM}^2}{2}, \quad (2.30)$$

в эквивалентной схеме:

$$W_k = \frac{J_{\partial}' \omega_{\partial}^2}{2}. \quad (2.31)$$

Приравнявая эти выражения, получим выражение для эквивалентного момента инерции, приведенного к валу двигателя:

$$J_{\partial}' = J_{\partial} + J_{M1} + \frac{J_p \omega_{\partial}^2}{\omega_{\partial}^2} + \frac{J_{M2} \omega_{\partial}^2}{\omega_{\partial}^2} + \frac{m_{PM} V_{PM}^2}{\omega_{\partial}^2}, \quad (2.32)$$

или с учетом того, что $\frac{\omega_{\partial}}{\omega_{\partial}} = i_p$

$$J_{\partial}' = J_{\partial} + J_{M1} + \frac{J_p}{i_p^2} + \frac{J_{M2}}{i_p^2} + m_{PM} \frac{V_{PM}^2}{\omega_{\partial}^2}. \quad (2.33)$$

В практических расчетах можно приближенно принимать момент инерции редуктора равным $(0,2 \div 0,3) J_{\partial}$, а момент инерции муфты - $(0,05 \div 0,1) J_{\partial}$.

В общем случае, когда в механическую часть привода входит несколько передаточных устройств, имеющих соответствующие передаточные числа $i_1, i_2, \dots, i_n$ и несколько элементов, совершающих вращательное и поступательное движение, эквивалентный приведенный момент инерции определяют по формуле:

$$J_{\partial}' = J_{\partial} + J_{\Sigma} + \sum \frac{J_n}{i_n^2} + \sum m_n \cdot \frac{V_n^2}{\omega_{\partial}^2}, \quad (2.34)$$

где J_{Σ} - суммарный момент инерции звеньев, вращающихся со скоростью двигателя; J_n - момент инерции n-го элемента; i_n - общее передаточное отношение для n-го элемента; m_n - масса n-го элемента, совершающего поступательное движение; V_n - линейная скорость движения n-го элемента;

Момент инерции двигателя J_{∂} , определяется из паспортных данных на двигатель, или по значению его махового момента GD^2 , выраженного в кгс·м²:

$$J = \frac{GD^2}{4g}, \text{ кгм}^2. \quad (2.35)$$

Если маховый момент GD^2 указан в [кгм²], то

$$J = \frac{GD^2}{4}. \quad (2.36)$$

В тех случаях, когда требуется определить приведенную инерционную массу системы, движущейся поступательно, исходным уравнением также является уравнение равенства запаса кинетической энергии в реальной и эквивалентной схемах, но расчет выполняется относительно элемента, движущегося поступательно.

Для рассмотренной выше схемы приведенная инерционная масса может быть определена следующим образом:

$$W_{k(исх)} = \frac{J_{\partial} \omega_{\partial}^2}{2} + \frac{J_{M1} \omega_{\partial}^2}{2} + \frac{J_p \omega_{\partial}^2}{2} + \frac{J_{M2} \omega_{\partial}^2}{2} + \frac{J_{\partial} \omega_{\partial}^2}{2} + \frac{m_{PM} v_f^2}{2}$$

$$W_{k(прив)} = \frac{m_{\partial}' v_{PM}^2}{2},$$

где

$$m_{\partial}' = \frac{J_{\partial} \omega_{\partial}^2}{V_{PM}^2} + \frac{J_{M1} \omega_{\partial}^2}{V_{PM}^2} + \frac{J_p \omega_{\partial}^2}{V_{PM}^2} + \frac{J_{M2} \omega_{\partial}^2}{V_{PM}^2} + \frac{J_{\partial} \omega_{\partial}^2}{V_{PM}^2} + m_{PM}.$$

2.4. Механические характеристики электродвигателей и производственных механизмов

При решении различных задач, касающихся исследования работы ЭП или его проектирования, весьма важным является знание механических свойств основных звеньев приводного двигателя и рабочего механизма (или его исполнительных органов). Так, например, на стадии проектирования, знание этих свойств необходимо с целью правильного подбора элементов привода, соответствие механических свойств которых обеспечит надежную и экономичную работу системы. В то же время в процессе эксплуатации приходится корректировать параметры привода, исходя из требований или изменений в технологическом процессе, что, требует сравнения свойств и характеристик двигателя и рабочей машины.

Установление механических свойств и особенностей названных звеньев ЭП возможно при изучении и анализе их механических характеристик, которые представляют собой зависимости, отражающие связь между моментом и скоростью движения.

Зависимость между скоростью вращения двигателя и его моментом в любом режиме работы, в том числе и переходном, называется динамической механической характеристикой.

Если ЭП работает в установившемся (статическом) режиме, то зависимость скорости его вращения от момента называется *статической механической характеристикой* (часто эту характеристику называют просто механической характеристикой). Механические характеристики могут быть представлены как в аналитическом, так и графическом виде. В последнем случае механическая характеристика представляет собой геометрическое место точек на координатной плоскости (ω , M), соответствующих установившемуся режиму работы.

Причем, для производственных механизмов, приводимых в движение с помощью электродвигателя, независимой переменной является скорость, так как момент сопротивления возникает как реакция внешних сил на движущееся тело. Поэтому:

Механической характеристикой производственного механизма называется зависимость момента сопротивления от его угловой скорости.
 $M_c = f(\omega)$.

Момент сопротивления M_c , который еще называют статическим моментом (или моментом нагрузки) - это момент, создаваемый рабочей машиной, который приходится преодолевать двигателю. В зависимости от причины, обуславливающей возникновение момента сопротивления, различают *активный* и *реактивный* моменты сопротивления.

Реактивный момент сопротивления появляется только вследствие движения, как противодействующая реакция механического звена на это движение. Например: момент трения, возникающий как при вращательном, так и при поступательном движении, момент сопротивления, вызванный реакцией окружающей среды (например, момент на лопатках вентилятора при вращении последних и т.п.). Реактивный момент направлен всегда против движения и при изменении направления этого движения знак момента также изменяется на обратный. Элемент, создающий реактивный момент, может быть только потребителем энергии.

Активный момент сопротивления появляется независимо от движения ЭП и создается посторонними источниками механической энергии, например: момент, обусловленный весом поднимаемого или опускаемого груза, напором воды и т.п. Направление активного момента не зависит от направления вращения (или поступательного движения). Источник, создающий активный момент, может, как потреблять, так и отдавать энергию.

Для двигателя, наоборот, момент, определяемый взаимодействием тока двигателя с магнитным потоком, является независимой переменной, поэтому:

механической характеристикой двигателя называют зависимость угловой скорости вращения двигателя от его вращающего момента
 $\omega = f(M)$.

Механическая характеристика двигателя раскрывает его нагрузочные

свойства, показывая, как изменяется его скорость вращения с изменением нагрузки на валу. Иногда механические характеристики могут быть представлены и другими функциями.

2.4.1. Механические характеристики рабочих машин

Рассматривая различные производственные механизмы, несложно видеть, что все они обладают различными механическими свойствами, т.е. имеют различные механические характеристики.

Для большинства производственных механизмов механические характеристики могут быть описаны аналитически с помощью обобщенной формулы вида:

$$M_c = M_{x.x} + (M_{c.ном.} - M_{x.x}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^x,$$

где $M_{c.ном.}$ - момент сопротивления механизма при номинальной скорости вращения; $M_{x.x}$ - момент холостого хода (момент трения в движущихся частях); x - показатель степени, характеризующий изменение момента при изменении скорости.

В зависимости от степени изменения момента сопротивления от скорости вращения можно классифицировать механические характеристики производственных механизмов на следующие основные категории.

Механическая характеристика момента сопротивления, не зависящая от угловой скорости.

Очевидно, что при $x=0$ $M_c = const$. Для реактивного момента $M_c = f(\omega)$ можно представить зависимость

$$M_c(\omega) = \text{sign} \omega \cdot \left(M_0 + (M_{CH} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^x \right).$$

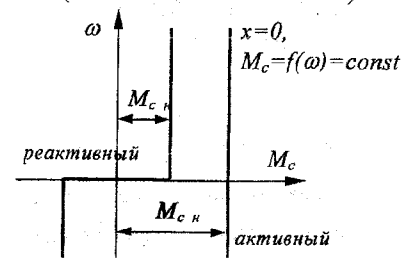


Рис.2.17. Механическая характеристика рабочей машины, не зависящая от скорости вращения

Для характеристик, представленных на рис.2.17., статический момент $M_c = const$, ($x = 0$), и он не зависит от скорости. Такую характеристику имеют подъемные краны, лебедки, конвейеры и, с известным приближением, все механизмы, у которых основным видом сопротивления является трение, так как в пределах рабочих скоростей момент трения обычно изменяется незначительно.

Линейно возрастающая механическая характеристика статического момента

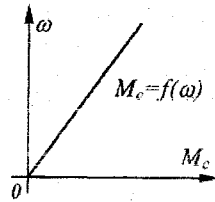


Рис. 2.18. Механическая характеристика рабочей машины, линейно зависящая от скорости вращения.

$$M_c = M_{сн} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right), M_0 = 0; x = 1,0$$

В этом случае ($x=1$) и момент сопротивления линейно зависит от скорости. Такую характеристику, например, имеет генератор постоянного тока с независимым возбуждением, работающий на постоянный внешний резистор.

Нелинейно-возрастающая (параболическая, или вентиляторная) механическая характеристика.

Этой характеристике соответствует выражение:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2$$

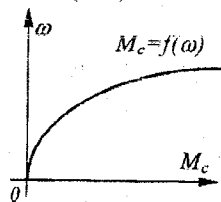


Рис. 2.19. Вентиляторная механическая характеристика

Механизмы, имеющие такую характеристику, называют механизмами с вентиляторным моментом, поскольку у вентиляторов M_c зависит от ω^2 . Примерами механизмов с вентиляторной характеристикой могут служить: вентиляторы, центробежные насосы, турбокомпрессоры. Они называются также турбомеханизмами, а их отличие состоит лишь в значении показателя степени x :

для вентиляторов - $x = 2$;
для турбокомпрессоров - $x = 2+2.5$;
для насосов - $x = 3+4$, причем значение x зависит от протитодавления в сети.

Нелинейно-спадающая механическая характеристика.

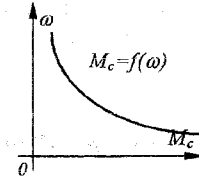


Рис. 2.20. Нелинейно-спадающая механическая характеристика рабочей машины ($x = -1$).

Зависимость статического момента можно представить в виде:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^{-1}$$

Для таких характеристик, в первом приближении, моменты сопротивления изменяются обратно пропорционально скорости:

$$M \approx \frac{k}{\omega}, \text{ или } M\omega = k.$$

Это значит, что мощность, потребляемая механизмом, имеющим такую характеристику, всегда остается неизменной. Такая характеристика свойственна различным металлорежущим станкам (токарный, фрезерный, расточный), моталки и т.п.

Кроме названных (наиболее широко распространенных), механических характеристик производственных механизмов (рабочих машин), следует отметить характеристики кривошипно-шатунных механизмов. Момент сопротивления таких РМ зависит от угла поворота ротора двигателя (от положения кривошипа). Примером могут служить поршневые насосы, ткацкие станки, рулевой привод морских судов и т.д.:

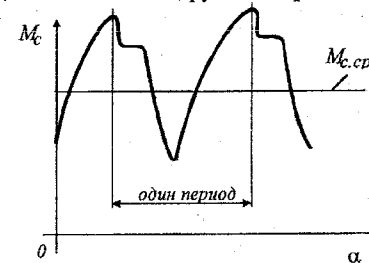


Рис. 2.21. Механические характеристики циклического типа.

В этом случае момент M_c складывается с постоянной составляющей M_{cp} и переменной M_e , периодически изменяющейся от угла поворота (α) вала двигателя. Такая переменная составляющая может быть представлена в виде суммы гармонических колебаний (рядом Фурье).

Следует указать, что у транспортных и подъемных механизмов M_c зависит не только от скорости, но и от положения механизма относительно пути его перемещения.

2.4.2. Механические характеристики электрических двигателей

Все электрические двигатели, за исключением синхронных, обладают тем свойством, что их скорость вращения является убывающей функцией момента двигателя. Однако, степень уменьшения скорости с изменением момента у различных двигателей различна и характеризуется параметром, называемым *жесткостью* механической характеристики.

Жесткость механической характеристики - это отношение разности электромагнитных моментов, развиваемых электрическим двигателем, к соответствующей разности угловых скоростей:

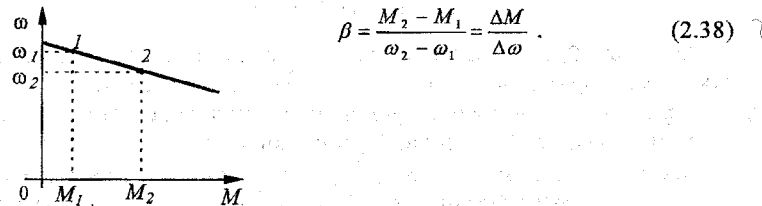


Рис.2.22. Графическое определение жесткости механической характеристики.

В зависимости от того, по какому закону изменяется скорость при изменении момента на валу двигателя (линейно или нелинейно), жесткость характеристик может быть как постоянной по величине, так и переменной.

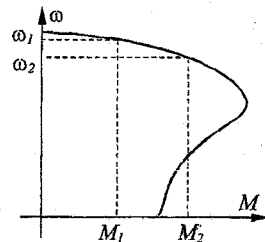


Рис. 2.23. Определение жесткости нелинейных механических характеристик.

В последнем случае она определяется как первая производная момента по скорости в каждой точке характеристики (рис.2.23.):

$$\beta = dM/d\omega. \quad (2.39)$$

Обычно на рабочих участках механические характеристики двигателей имеют отрицательную жесткость. Понятие жесткости применимо и к характеристикам производственных механизмов.

По жесткости характеристики двигателей можно разделить на четыре категории.

Абсолютно жесткая механическая характеристика.

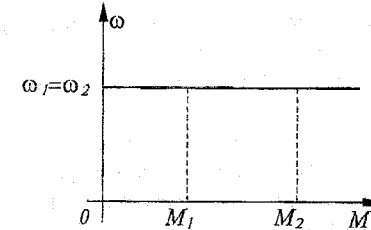


Рис. 2.24. Абсолютно жесткая механическая характеристика.

Это такая характеристика, для которой при изменении момента на валу скорость вращения двигателя остается неизменной:

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta M}{0} = \infty$$

Такую характеристику имеют синхронные двигатели.

Жесткая характеристика двигателя.

Это характеристики, у которых скорость с изменением момента уменьшается весьма незначительно. Такую характеристику имеют, например, асинхронные двигатели в пределах рабочей части характеристики, или двигатели постоянного тока независимого возбуждения. Для таких характеристик $\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} \geq 10$.

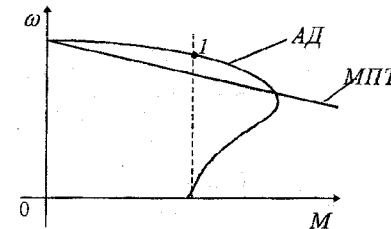


Рис. 2.25. Жесткая механическая характеристика.

Мягкая характеристика имеет место при $\beta < 10$.

Это такая характеристика, у которой при изменении момента скорость изменяется в значительных пределах ($\Delta \omega > 10\% \omega_n$).

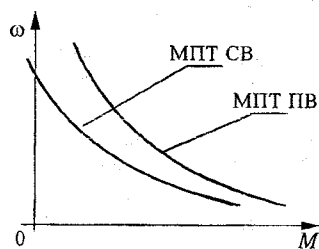


Рис. 2.26. Мягкая механическая характеристика двигателя.

К мягким характеристикам относятся характеристики двигателя последовательного возбуждения реостатные характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения и асинхронных двигателей.

Абсолютно мягкая механическая характеристика ($\beta = 0$).

Это характеристика, при которой момент двигателя с изменением скорости остается неизменным (рис.2.27.) (такую характеристику, к примеру, имеет двигатель постоянного тока независимого возбуждения при работе в замкнутых системах в режиме стабилизации тока):

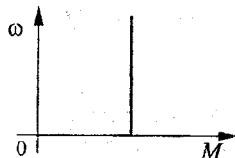


Рис. 2.27. Абсолютно мягкая механическая характеристика.

В процессе работы ЭП часто необходимо обеспечить возможность регулирования скорости двигателя. При этом одним из показателей является *статизм* механической характеристики, достигаемый в процессе регулирования и зависящий от жесткости механической характеристики.

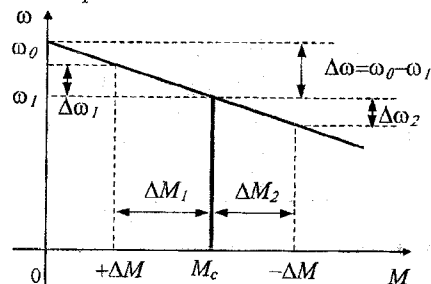


Рис.2.28. Определение статической ошибки и статизма механической характеристики.

Статизм характеристики (Δ) - это отношение статической ошибки по скорости $\Delta\omega$ к скорости идеального холостого хода выражаемый в процентах:

$$\Delta = \frac{\Delta\omega}{\omega} \cdot 100\% \quad (2.40)$$

Статическая ошибка по скорости - это отклонение скорости от заданной величины при изменении момента нагрузки на валу. Если в процессе регулирования жесткость характеристики изменяется, то отклонение скорости также будет изменяться. Чем выше скорость, тем меньше $\Delta\omega$ и тем меньше статизм характеристик. Величина статизма характеристик имеет непосредственное влияние на точность ЭП и производительность механизма.

При разработке систем электропривода следует добиваться уменьшения статизма характеристик.

В установившемся режиме вращающий момент равен статическому моменту, $M_0 = M_c$. Поэтому механическая характеристика производственного механизма отражает закон изменения приведенного к валу двигателя момента нагрузки в зависимости от скорости. Механическая характеристика двигателя показывает, как изменяется его скорость вращения при различной нагрузке. Статическая составляющая момента двигателя уравнивает момент, создаваемый нагрузкой, поэтому они равны по абсолютной величине, но противоположны по знаку, то есть $M_c = -M_{PM}$ (рис.2.29).

На основании этого условия легко определить координаты установившегося движения ω_c и момент M_c двигателя, построив на общем графике механические характеристики двигателя $\omega = f(M_{dv})$ и зеркальное отражение механической характеристики рабочей машины (механизма) $\omega = f(M_c)$.

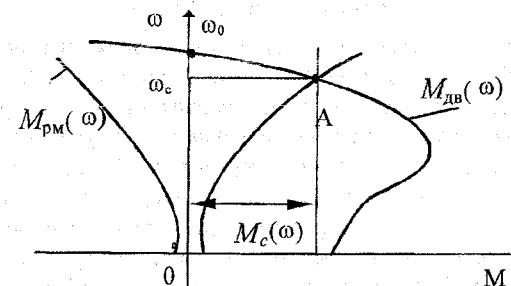


Рис. 2.29. Совмещенные механические характеристики двигателя и рабочей машины.

2.5. Статическая устойчивость электропривода

Работе электродвигателя и рабочей машины в установившемся режиме соответствует равновесие моментов двигателя и рабочей машины, и точка установившегося режима на координатной плоскости может быть определена как точка пересечения механических характеристик двигателя и рабочей машины, значений взятых по абсолютной величине. При этом существенным является возможность поддержания длительной устойчивой работы привода в установившемся режиме.

Установим физическую сущность процессов, возникающих в ЭП при отклонении от параметров установившегося режима. Если, например, момент сопротивления $M_{с1}$ на валу двигателя изменился, как показано на рис.2.30. до величины $M_{с2}$, то это приведет к тому, что скорость и вращающий момент двигателя также изменятся и привод будет продолжать устойчиво работать, но уже при другой скорости и вращающем моменте (точка В).

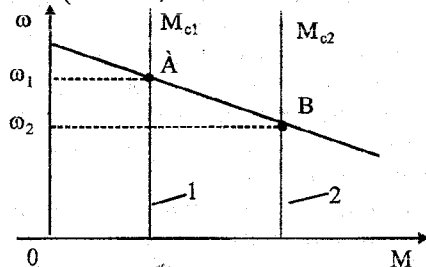


Рис. 2.30. Изменение точки установившегося (статического) режима при внешнем воздействии.

Причем, если во всех неэлектрических двигателях для восстановления равновесия между изменившимся моментом сопротивления и моментом двигателя требуется участие специальных внешних регуляторов, которые воздействуют на источник энергии (уменьшают или увеличивают подачу топлива, пара и т.д.) и, тем самым, изменяют $M_{дв}$, то в электрических двигателях роль такого автоматического регулятора выполняет ЭДС двигателя. Особенность электрических двигателей, заключающаяся в способности автоматически (без внешних регуляторов) поддерживать равновесие системы при возникновении возмущений, является весьма ценным свойством.

Рассмотрим, ссылаясь на рис.2.30., как это происходит. Характеристика 1 соответствует, например, работе конвейера на холостом ходу (то есть $M_{с1} = M_{xx}$). Если конвейер загрузить, то момент сопротивления возрастает и станет уже равным $M_{с2}$. При этом, пока

двигатель работал на холостом ходу, его скорость была ω_1 . При увеличении нагрузки двигатель начинает тормозиться, скорость его снижается и его ЭДС при этом уменьшается ($E = k\Phi\omega$). Уменьшение ЭДС приведет к увеличению тока в цепи якоря и момента, развиваемого двигателем. Рост момента будет продолжаться до тех пор, пока не наступит равновесие моментов двигателя и $M_{с2}$ (точка ω_2). Эта точка будет соответствовать новому установившемуся режиму.

Рассмотренные условия работы привода в установившемся режиме, характеризуют *статическую устойчивость привода*. Как и всякое состояние равновесия, установившийся режим может быть устойчивым и неустойчивым.

Устойчивым состоянием привода, или просто статической устойчивостью, называется способность системы приходить в состояние устойчивого равновесия после того, как она была выведена из этого равновесия бесконечно малыми возмущениями.

Другими словами, если при сколь угодно малых отклонениях от статического режима (установившегося режима) система возвращается вновь к установившемуся режиму, то можно считать, что такая система устойчива. Условия устойчивости системы, определяются формой механической характеристики двигателя и рабочей машины.

Для механической системы критерием устойчивости является условие возникновения динамического усилия, возвращающего систему в исходное состояние при выведении системы из равновесия. Здесь знак динамического усилия противоположен знаку приращения координаты, характеризующей выведение системы из состояния равновесия (рис.2.31).

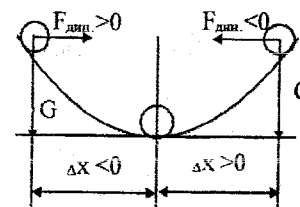
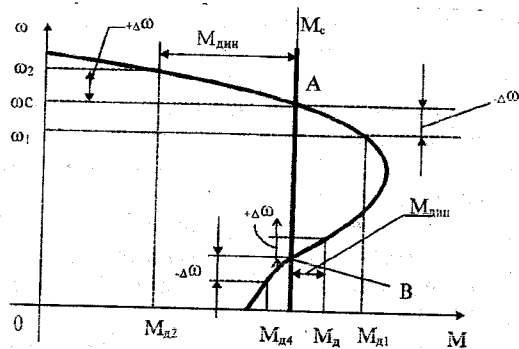


Рис. 2.31. Условие статического равновесия системы

Применительно к ЭП можно сказать, что, *необходимым и достаточным условием устойчивости работы ЭП является противоположность знаков у приращения скорости, характеризующего выведение ЭП из равновесия, и у возникающего при этом динамического момента:*

$$\frac{M_{дин}}{\Delta\omega} < 0. \quad (2.41)$$

Рассмотрим случай, когда момент механизма является величиной постоянной, то есть $\beta_c = 0$, а в качестве приводного двигателя используется асинхронный двигатель (АД), рис.2.32.

Рис. 2.32. Устойчивость асинхронного двигателя при $M_c = \text{const}$.

При $M_d = M_c$ двигатель работает с установившейся скоростью ω_c в точке А. Если под влиянием каких-либо возмущений скорость уменьшится до величины ω_1 (при этом приращение скорости $\omega_1 - \omega_c = \Delta\omega < 0$), то момент двигателя возрастает до значения M_{d1} , а так как момент механизма M_c остается неизменным, то под воздействием возникшего положительного динамического момента $M_{дин} = M_{d1} - M_c > 0$ привод начинает разгоняться, так как $\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{дин}}{J} > 0$. Этот процесс закончится, когда скорость вращения двигателя достигнет значения $\omega = \omega_c$.

При увеличении скорости на $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 > 0$ возникает динамический момент $M_{дин} = M_{d2} - M_c < 0$ и, следовательно, $\frac{d\omega}{dt} < 0$. Благодаря этому привод будет замедляться до скорости ω_c . Следовательно, можно сделать вывод, что в точке А привод статически устойчив.

Отношение динамического момента $M_{дин}$ к перепаду скорости $\Delta\omega$ называется коэффициентом устойчивости:

$$k_{уст} = \frac{M_{дин}}{\Delta\omega} \quad (2.42)$$

Установившийся режим работы возможен и в точке В, для которой также справедливо условие $M_d = M_c$. Однако, при возникновении положительного приращения скорости динамический момент $M_{дин}$ в данном случае $M_{дин} = M_{d3} - M_c > 0$ будет также положительным, что приведет к дальнейшему возрастанию скорости, так как в этом случае $\frac{d\omega}{dt} > 0$.

И, наоборот, при снижении скорости на $\Delta\omega$ (для точки В) $M_{дин}$ также становится меньше нуля, и скорость привода будет уменьшаться.

Следовательно, в точке В электропривод не обладает статической устойчивостью.

Рассмотрим другой пример. Пусть характеристика рабочей машины имеет другой вид (например, вентиляторная характеристика), рис.2.33:

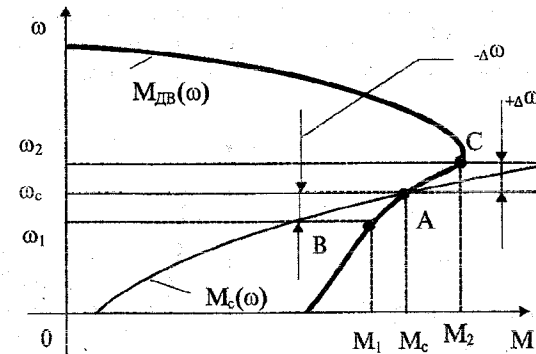


Рис. 2.33. Совместная работа асинхронного двигателя при вентиляторном моменте нагрузки.

Очевидно, что при изменении скорости от ω_c до ω_1 момент двигателя изменяется от M_c и до M_1 и динамический момент:

$$M_{дин} = \Delta M_d - \Delta M_c = \beta_d \Delta\omega - \beta_c \Delta\omega,$$

где $\Delta M_d = M_1 - M_d$; $\Delta M_c = M_2 - M_c$; $\beta_d = \frac{\Delta M_d}{\Delta\omega}$; $\beta_c = \frac{\Delta M_c}{\Delta\omega}$,

причем, в данном случае $\Delta M_d < \Delta M_c$, следовательно, коэффициент устойчивости:

$$k = \frac{M_{дин}}{\Delta\omega} = \frac{(\beta_d - \beta_c)\Delta\omega}{\Delta\omega} = (\beta_d - \beta_c) < 0.$$

Если же скорость изменяется, например, от ω_c до ω_2 , то $\Delta\omega > 0$ а динамический момент:

$$M_{дин} = \Delta M_d - \Delta M_c = (\beta_d - \beta_c)\Delta\omega < 0,$$

и коэффициент устойчивости

$$k = \frac{M_{дин}}{\Delta\omega} < 0.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что устойчивость привода зависит от характера моментов двигателя и рабочей машины.

В точке В работа привода в данном случае будет устойчивой. Нетрудно сделать теперь вывод, исходя из выражений для динамического момента и коэффициента устойчивости

$$M_{дин} = \beta_d \Delta \omega - \beta_c \Delta \omega \text{ и } k = \frac{M_{дин}}{\Delta \omega} = \beta_d - \beta_c,$$

что в точках устойчивого равновесия выполняется следующее неравенство:

$$\beta_d - \beta_c < 0 \text{ или } \beta_d < \beta_c.$$

Соответственно, если $\beta_d - \beta_c > 0$ или $\beta_d > \beta_c$, то режим работы привода неустойчив. Например, для двигателя последовательного возбуждения (рис.2.34) в соответствии с приведенным выше положением точка A1 точка устойчивого режима, а A2 - неустойчивого.

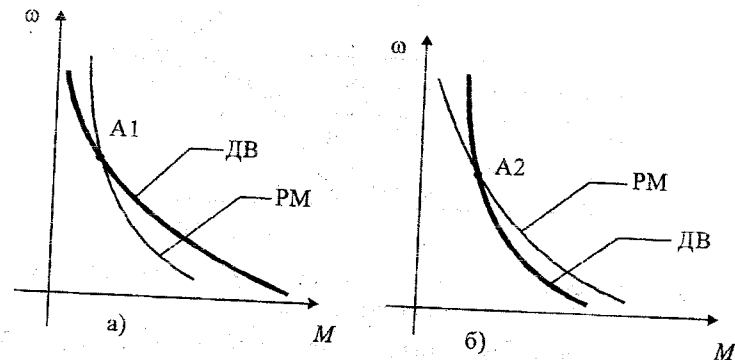


Рис. 2.34. Примеры устойчивой (а) и неустойчивой (б) работы двигателя и рабочей машины.

Глава 3

Свойства и характеристики двигателей постоянного тока

3.1. Основные положения

Нерегулируемым электроприводом называют систему, в которой отсутствует возможность регулирования скорости вращения средствами самого электропривода.

Это наиболее простой вид ЭП, широко используемый практически во всех отраслях народного хозяйства в установках, не требующих регулирования скорости вращения производственных машин или их рабочих органов. В настоящее время нерегулируемый электропривод составляет свыше 85 % от общего числа электроприводов и является основным потребителем электрической энергии.

Основой нерегулируемого электропривода является электрический двигатель (асинхронный, синхронный или двигатель постоянного тока), который непосредственно или через трансформатор подключают к питающей сети. При этом изменение частоты вращения может быть достигнуто только за счет изменения нагрузки на валу двигателя. Так, если в структуру нерегулируемого ЭП входит двигатель постоянного тока, то привод называют приводом постоянного тока.

Так как электрическая машина в силу своих конструктивных особенностей и электрических свойств может обеспечивать циркуляцию потока энергии в обоих направлениях, т.е. как со стороны сети к валу, так и со стороны вала на сеть, то естественно предположить, что ЭП в нерегулируемом варианте (кроме ЭП на базе двигателей постоянного тока последовательного возбуждения) может работать в любом из режимов: двигательном или тормозном. При этом свойства нерегулируемого ЭП практически целиком определяются механическими и электрическими свойствами самого двигателя.

Двигатели постоянного тока (ДПТ) являются основой широкого класса ЭП постоянного тока, как в нерегулируемом, так и в регулируемом вариантах. На базе ДПТ реализуется привод различных механизмов в металлургии (прокатные станы, кантователи, транспортеры); на транспорте (электровозы, тепловозы, электропоезда); в грузоподъемных и землеройных устройствах (краны, шахтные подъемники, экскаваторы); на морских и речных судах, в металлообрабатывающей, текстильной, полиграфической промышленности и еще в целом ряде устройств и механизмов.

Маломощные ДПТ широко используются в системах автоматики. В сочетании с тиристорными преобразователями, позволяющими осуществлять питание ДПТ от сети переменного тока, эти двигатели получили широкое применение в системах регулируемого ЭП постоянного тока (следует заметить, что в последнее время все более широкое предпочтение отдается ЭП на основе двигателей переменного тока в силу целого ряда преимуществ, и, прежде всего, благодаря отсутствию коллектора и возможности наращивания мощностей установок). Вплоть до настоящего времени широко использовались машины постоянного тока в качестве генераторов для питания двигателей постоянного тока в стационарных и передвижных установках, как источники электроэнергии для заряда аккумуляторных батарей, питания электролизных и гальванических ванн, для электроснабжения различных потребителей на автомобилях, самолетах, пассажирских вагонах и др. В последнее время использование генераторов постоянного тока снизилось благодаря внедрению полупроводниковых преобразователей (на транспорте синхронных генераторов, работающих совместно с полупроводниковыми выпрямителями), которые гораздо надежнее в эксплуатации и проще в обслуживании.

Двигатели постоянного тока делят на три группы:

- двигатели постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ);
- двигатели постоянного тока последовательного возбуждения или серийные (ДПТ ПВ);
- двигатели постоянного тока смешанного возбуждения (ДПТ СВ).

Ниже будут рассмотрены характеристики и электромеханические свойства каждой группы.

3.2. Электромеханические и механические характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения

Двигатели постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) выпускаются в настоящее время в диапазоне мощностей от 0.1÷20 кВт до 10.0 Мвт. Ограничение их по мощности обусловлено следующими причинами:

- с увеличением мощности ДПТ коллектор машины становится по массе и габаритам сравним с массой якоря (диаметр коллектора в мощных ДПТ НВ достигает 2÷3 м);
- усложняются условия коммутации, снижается надежность машины и ее работоспособность.

Применяют ДПТ НВ, в основном, для длительного режима работы. Частично они используют в механизмах с повторно-кратковременным режимом работы, когда требуется устойчивые полная и пониженные скорости вращения.

В регулируемом варианте ДПТ НВ применяют в системе Г-Д и повсеместно замещающей ее системе тиристорный преобразователь-двигатель. В конструктивном отношении ДПТ НВ является наиболее сложной машиной, однако легко управляемой. В настоящее время на их основе реализуется около 90% систем регулируемых ЭП. Диапазон скоростей, выпускаемых современных ДПТ НВ колеблется в пределах $6÷300 \text{ с}^{-1}$.

Анализ свойств и статических режимов работы ДПТ НВ достаточно полно можно осуществить на основе его электромеханической и механической характеристик.

Электромеханической или скоростной характеристикой называется зависимость угловой скорости двигателя от тока в силовой цепи

$$\omega = f(I).$$

Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его угловой скорости от вращающего момента, создаваемого взаимодействием его магнитного потока и тока в его обмотках:

$$\omega = f(M).$$

Характеристика называется естественной, если она получена при подключении его к электрической сети с напряжением, соответствующем номинальному, при номинальном потоке возбуждения и без дополнительных сопротивлений в силовой цепи.

Искусственными называются характеристики, получаемые при изменении какого-либо параметра двигателя: напряжения питания, частоты, потока возбуждения или сопротивления силовой цепи.

Искусственные механические характеристики используют для плавного пуска и торможения, а также для регулирования скорости вращения двигателя.

Механические характеристики используются для анализа работы двигателя совместно с приводимым в движение механизмом, а скоростные позволяют оценить нагрузку двигателя по току, что очень важно, так как нагрузка по току ограничивается условиями нагрева и условиями нормальной (безискровой) коммутации. Вместе с тем, электромеханические и механические характеристики тесно взаимосвязаны, так как электромагнитный момент, развиваемый двигателем, определяется значениями тока и потока машины.

Схема включения ДПТ НВ представлена на рис.3.1.

Якорь двигателя и обмотка возбуждения (ОВ) получают питание от независимых источников напряжения, что дает возможность отдельно

регулировать напряжение на якоре и ОВ и выполнять их на разное номинальное напряжение.

Если мощность питающего источника U_c во много раз превышает номинальную мощность ДПТ, то его внутреннее сопротивление ничтожно мало и практически не зависит от тока в сети. Благодаря этому ОВ может быть соединена параллельно с якорем (показано пунктиром), а включение ДПТ с параллельным (шунтовым) возбуждением на сеть не вызовет колебаний напряжения этой сети ($U_c = const$). В результате цепи якоря и ОВ влияния друг на друга не оказывают, то есть становятся независимыми, как и в схеме с независимым возбуждением.

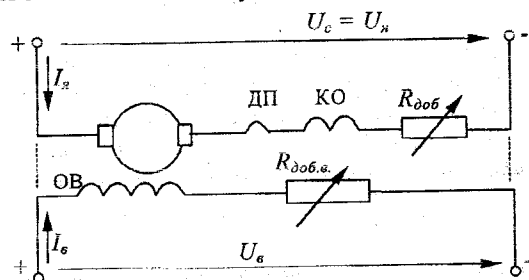


Рис. 3.1. Принципиальная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

При выводе уравнения механической характеристики ДПТ НВ предполагается, что:

- в нем имеется компенсирующая обмотка (КО) и обмотка дополнительных полюсов (ДП), которые позволяют не учитывать влияние реакции якоря;
- напряжение сети постоянно $U_c = const$;
- источник питания бесконечной мощности;
- сопротивление соединительных проводов равно нулю;
- магнитный поток двигателя равен номинальному и постоянен;
- щетки двигателя расположены на нейтрали; коммутация машины считается идеальной.

Схема замещения якорной цепи ДПТ НВ представлена на рис.3.2.

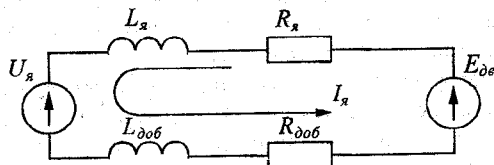


Рис. 3.2. Схема замещения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

На ее основе запишем уравнение электрического равновесия якорной цепи для любого момента времени:

$$R_{\Sigma} I_{\text{я}}(t) + L_{\Sigma} \frac{dI_{\text{я}}(t)}{dt} + E_{\text{дв}}(t) = U_{\text{я}}(t), \quad (3.1)$$

где - $I_{\text{я}}(t)$, $U_{\text{я}}(t)$, $E_{\text{дв}}(t)$ - соответственно мгновенное значение тока, напряжения, подводимого к якору и э.д.с. двигателя;
 $R_{\Sigma} = R_{\text{я}} + R_{\text{доб}}$; $R_{\text{я}} = R_{\text{о.я.}} + R_{\text{д.п.}} + R_{\text{к.о.}} + R_{\text{ш}}$ - активное сопротивление якорной цепи;
 $L_{\Sigma} = L_{\text{я}} + L_{\text{доб}}$; $L_{\text{я}} = L_{\text{я}} + L_{\text{д.п.}} + L_{\text{к.о.}}$ - индуктивность якорной цепи.

Поведение ДПТ НВ описывается также следующими уравнениями:

- уравнением э.д.с. двигателя:

$$E(t) = K_e \Phi \omega(t), \quad (3.2)$$

где $K_e = \frac{pN}{2\pi a}$ - конструктивный параметр ДПТ: p - число пар полюсов,

N - число активных проводников обмотки якоря; a - число параллельных ветвей обмотки якоря, Φ - магнитный поток (Вб), ω - угловая скорость (рад/сек);

- уравнением момента (на основании закона Ампера):

$$M(t) = K_m \Phi I_{\text{я}}(t), \quad (3.3)$$

где - $M(t)$ - электромагнитный момент двигателя (Нм), $K_m = K_e = K$ - конструктивный коэффициент (равенство K_e и K_m справедливо только при условии, что все параметры в формуле выражены в единицах СИ);

- уравнением движения:

$$M(t) - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (3.4)$$

где - $M(t)$ - электромагнитный момент двигателя, M_c - момент сопротивления, J_{Σ} - суммарный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя, ω - угловая частота вращения двигателя.

Таким образом ДПТ НВ может быть описан системой уравнений

$$U_{\text{я}}(t) = I_{\text{я}}(t) \cdot R_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{dI_{\text{я}}(t)}{dt} + K\Phi \cdot \omega(t);$$

$$M(t) = K\Phi \cdot I_{\text{я}}(t); \quad (3.5)$$

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega(t)}{dt} = K\Phi \cdot I_{\text{я}}(t) - M_c.$$

Эти уравнения пригодны для анализа двигателя как в статических, так и в динамических режимах. В частности, для статического (установившегося режима) система уравнений (3.1) примет вид:

$$U_{\text{я}} = IR_{\Sigma} + K\Phi\omega;$$

$$K\Phi I_{\text{я}} = M_{\text{д}} = M_c. \quad (3.6)$$

где U , I , ω , M - параметры ДПТ НВ в статическом режиме.

Из уравнения (3.6) можно записать выражение для электромеханической характеристики:

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} - \frac{I_a R_\Sigma}{K\Phi}, \text{ или } \omega = f(I_a). \quad (3.7)$$

Подставив в (3.6) вместо I_a его выражение через момент двигателя

$$I = \frac{M_\partial}{K\Phi}, \quad (3.8)$$

получим выражение для механической характеристики ДПТ НВ:

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} - \frac{MR_\Sigma}{(K\Phi)^2}, \text{ или } \omega = f(M). \quad (3.9)$$

При значении $U=U_n$, $\Phi=\Phi_n$, $R_\Sigma=R_{я\Sigma}$ уравнения (3.7) и (3.9) описывают естественную скоростную (3.10) и механическую (3.11) характеристики двигателя:

$$\omega_e = \frac{U_n - I_a R_{я\Sigma}}{K\Phi_n}; \quad (3.10)$$

$$\omega_e = \frac{U_n}{K\Phi_n} - \frac{MR_{я\Sigma}}{(K\Phi_n)^2}. \quad (3.11)$$

При условии, что $\Phi = const$, уравнения скоростной и механической характеристик ДПТ НВ представляют собой прямые линии, отсекающие на осях координат ω и M отрезки:

$$\omega_0 = \frac{U}{K\Phi}, \text{ (при } M=0, \text{ или } I_a=0); \quad (3.12)$$

$$I_{к.з.} = \frac{U}{R_\Sigma}, \text{ (при } \omega=0); \quad (3.13)$$

$$M_{к.з.} = \frac{UK\Phi}{R_\Sigma}. \quad (3.14)$$

Общий вид естественной скоростной и механической характеристик ДПТ НВ приведен на рис. 3.3:

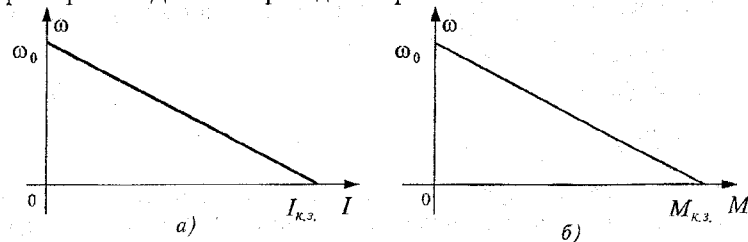


Рис.3.3. Электромеханическая (а) и механическая (б) характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Выражение (3.12) представляет собой скорость идеального холостого хода двигателя. Реально якорь может вращаться с $\omega=\omega_0$

только при условии, что к нему будет приложен вращающий момент со стороны механизма, компенсирующий постоянные потери двигателя (потери на трение, гистерезис, вентиляционные потери).

Значения тока и момента двигателя, приведенные в формулах (3.13) и (3.14) соответственно, называются током и моментом короткого замыкания, причем ток короткого замыкания не зависит от величины магнитного потока (для ДПТ $\frac{I_{к.з.}}{I_n} = 8 \div 10$, т.е. на порядок выше номинального).

Работа двигателя при $I_a > I_n$ отрицательно сказывается на работе щеточно-коллекторного аппарата, поэтому на практике необходимо ограничивать величину пускового тока до $(2 \div 2,5)I_n$.

Отношение

$$\frac{I_{к.з.}}{I_n} = 2 \div 2,5 = \lambda_i \quad (3.15)$$

называется допустимой перегрузочной способностью по току.

Второй член в уравнениях (3.7) и (3.9) обусловлен нагрузкой двигателя и сопротивлением якорной цепи и называется *статическим падением угловой скорости* ($\Delta\omega_c$) относительно ω_0 . Таким образом, выражение скоростной или механической характеристики двигателя можно записать в следующем виде:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_c. \quad (3.16)$$

$$\text{где } \Delta\omega_c = \frac{IR}{K\Phi} = \frac{MR}{(K\Phi)^2}.$$

Наименьшее значение $\Delta\omega_c$ имеет на естественной характеристике.

При введении в якорную цепь добавочного сопротивления R_∂ наклон характеристик увеличивается, а скорость двигателя при одной и той же нагрузке снижается (рис.3.4).

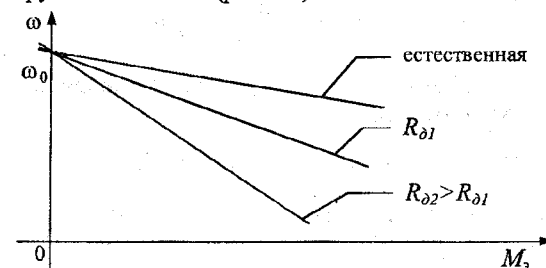


Рис. 3.4. Искусственные характеристики ДПТ НВ.

Искусственные характеристики, получаемые при введении в якорную цепь двигателя добавочного сопротивления, называют *реостатными*. На практике при работе ДПТ НВ в составе ЭП

используют как естественную, так и искусственные (реостатные) характеристики.

В общем случае механическая характеристика ДПТ представляет собой прямую линию проходящую через II, I, IV квадранты, причем, это справедливо лишь для механических характеристик $\omega=f(M_{\text{эл}})$. Механические характеристики (рис. 3.5), рассчитанные в функции момента на валу $\omega=f(M_{\text{в}})$, имеют разрыв непрерывности за счет того, что в двигательном режиме

$$M_{\text{в}} = M_{\text{э}} - M_{\text{х.х.}},$$

а в тормозном

$$M_{\text{в}} + M_{\text{х.х.}} = M_{\text{э}}.$$

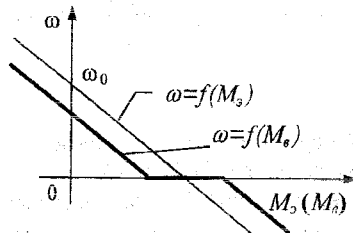


Рис. 3.5. Механические характеристики ДПТ НВ в функции электромагнитного момента и момента на валу.

3.3. Определение параметров двигателей постоянного тока независимого возбуждения по каталожным данным

Как правило, в паспортных данных на двигатель приводятся следующие параметры: $P_{\text{н}}$, $n_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$, $\eta_{\text{в}}$. Эти данные позволяют определить все основные параметры, характеризующие двигатель.

Номинальный момент на валу:

$$M_{\text{н}} [\text{Нм}] = \frac{P_{\text{н}} [\text{Вт}]}{\omega_{\text{н}} [\text{с}^{-1}]}, \quad \text{где } \omega_{\text{н}} = \frac{\pi n_{\text{н}}}{30} \approx 0,1047 n_{\text{н}}.$$

Номинальное сопротивление якоря $R_{\text{я}}$ и якорной обмотки определяются следующим образом:

$$R_{\text{я}} = 0,5(1 - \eta_{\text{в}}) \cdot R_{\text{н}} \quad \text{или} \quad R_{\text{я}} = 0,5 \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} (1 - \eta_{\text{в}}); \quad R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}.$$

Индуктивность якорной обмотки:

$$L_{\text{я.о.}} = k \frac{R_{\text{н}}}{p n_{\text{н}}} = k \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}} p n_{\text{н}}},$$

где p — число пар полюсов; k — зависит от конструкции якорной обмотки и находится в следующих пределах: $k = 4+6$ для ДПТ нормального исполнения; $k = 7+9$ для двигателей с компенсационной обмоткой.

Момент инерции двигателя:

$$J = 0,00015 M_{\text{н}}^{1,5} \quad [\text{кгм}^2].$$

Иногда в паспортных данных указывается маховый момент GD^2 , при этом:

$$\text{если } GD^2 [\text{кгм}^2], \quad \text{то } J = \frac{GD^2}{4};$$

$$\text{если } GD^2 [\text{кгсм}^2], \quad \text{то } J = \frac{GD^2}{4g};$$

$$\text{если } GD^2 [\text{Нм}^2], \quad \text{то } J = \frac{GD^2}{4g},$$

— коэффициент потока ДПТ:

$$K\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} R_{\text{я.о.}}}{\omega_{\text{н}}}$$

где $R_{\text{я.о.}} = R_{\text{я}} + R_{\text{д.п.}} + R_{\text{щ}} + R_{\text{к.о.}}$.

3.4. Режимы работы двигателей постоянного тока независимого возбуждения

Двигатель, являясь электромеханическим преобразователем, может работать в одном из двух режимов:

- двигательном (когда электрическая энергия, потребляемая двигателем от сети, преобразуется в механическую);
- тормозном (генераторном), когда механическая энергия, источником которой является РМ, преобразуется в электрическую.

К тормозным режимам работы относят:

- генераторное торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное торможение);
- торможение противовключением;
- электродинамическое торможение.

3.4.1. Двигательный режим работы

Двигательному режиму работы соответствует участок характеристики ДПТ, расположенный в I (или III) квадранте (рис.3.6).

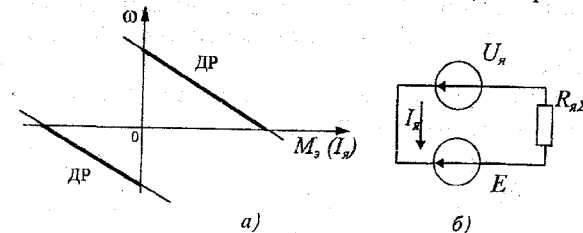


Рис. 3.6. Механическая характеристика (а) и схема замещения (б) для двигательного режима работы

В двигательном режиме напряжение, подводимое к якору больше наводимой электродвижущей силы (э.д.с.), причем э.д.с. направлена навстречу напряжению $U_{\text{я}}$, а направление тока якоря совпадает с направлением напряжения (это основной закон двигательного режима). На основании этого ток в двигательном режиме:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\Sigma}}{K\Phi_n}; I_{\text{я}} = \frac{U - K\Phi_n \omega}{R_{\Sigma}} = \frac{U_{\text{я}} - E}{R_{\Sigma}} > 0, \quad (3.19)$$

электромагнитный момент

$$M_{\text{э}} = K\Phi I_{\text{я}} \quad (3.20)$$

также будет больше нуля, т.е. он является движущим.

В то же время с позиций преобразования энергии

$$P_c = I_{\text{я}} U_{\text{я}} = (E + I_{\text{я}} R_{\Sigma}) I_{\text{я}}, \quad (3.21)$$

$$U_{\text{я}} I_{\text{я}} = I_{\text{я}} E + I_{\text{я}}^2 R_{\Sigma},$$

откуда

$$P_c = P_{\text{эм}} + \Delta P_{\text{эл}}$$

т.е. $P_c > P_{\text{эм}}$, следовательно, двигатель потребляет энергию из сети.

3.4.2. Тормозные режимы работы

Для осуществления тормозного режима двигателя необходимо, чтобы направления его э.д.с. и тока в якровой цепи $I_{\text{я}}$ совпадали. Исходя из схемы замещения, несложно видеть, что это возможно при следующих условиях:

- если $E > U_{\text{я}}$;
- если E совпадает с $U_{\text{я}}$ по направлению;
- если $U_c = 0$.

Рассмотрим отдельно каждый случай.

Режим рекуперативного торможения (режим работы параллельно с сетью)

Переход в этот режим будет иметь место, когда со стороны производственного механизма на вал двигателя действует момент M_c , совпадающий по направлению с моментом, развиваемым двигателем (например, при спуске груза, или в транспорте при движении вниз по наклонной поверхности и др.).

Из уравнения электрического равновесия ток, потребляемый двигателем из сети в двигательном режиме,

$$I = \frac{U_{\text{я}} - E}{R_{\Sigma}} = \frac{U - K\Phi\omega}{R_{\Sigma}}. \quad (3.2)$$

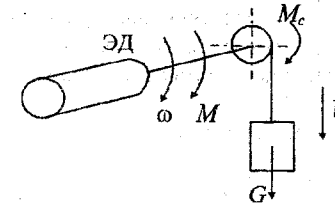


Рис. 3.7. Электропривод подъемной установки в режиме рекуперативного торможения

Под действием суммарного момента со стороны двигателя и рабочей машины система будет ускоряться, э.д.с. двигателя $E = K\Phi\omega$ будет расти, а ток - соответственно уменьшаться (рис.3.7. и рис.3.8).

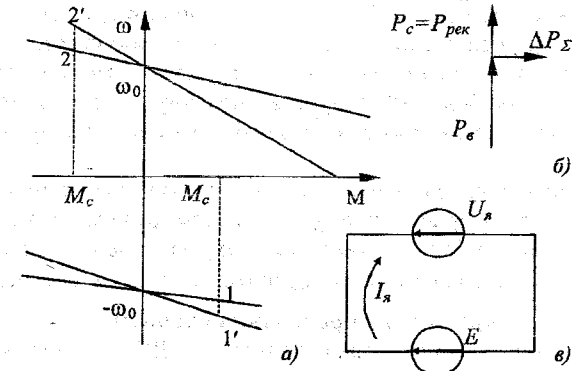


Рис. 3.8. Механические характеристики (а), диаграмма преобразования мощности (б) и схема замещения ДПТ НВ в режиме рекуперативного торможения

При достижении $\omega = \omega_0$ э.д.с. двигателя окажется равной напряжению, подводимому к якору, и машина окажется в режиме идеального холостого хода. Дальнейшее увеличение скорости под влиянием движущего момента РМ приведет к тому, что э.д.с. двигателя по абсолютной величине станет больше напряжения питания ($|E| > |U_{\text{я}}|$), при этом ток якоря изменит свое направление:

$$I = \frac{U - E}{R_{\Sigma}} = -\frac{(E - U)}{R_{\Sigma}} < 0 \quad (3.23)$$

и машина перейдет из двигательного режима в генераторный, отдавая энергию в сеть, а двигатель при этом будет развивать тормозной момент. Установившемся режиму работы (когда тормозной момент двигателя достигнет величины движущего момента РМ) будут соответствовать точки 1(1'), или 2(2') на координатной плоскости.

Ввиду того, что переход в этот режим произошел без изменения параметров привода и схемы его включения, а только за счет подвода к валу машины дополнительного момента, уравнения скоростной и механической характеристики остаются такими же, как и для двигательного режима:

Электромеханическая характеристика:

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} - \frac{(-I_{\text{я}})R_{\Sigma}}{K\Phi} = \frac{U + I_{\text{я}}R_{\Sigma}}{K\Phi} \quad (3.24)$$

Механическая характеристика:

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} - \frac{(-M)R_{\Sigma}}{(K\Phi)^2} = \frac{U}{K\Phi} + \frac{MR_{\Sigma}}{(K\Phi)^2} \quad (3.25)$$

Тормозному режиму с рекуперацией энергии в сеть соответствует участок характеристики, расположенный во II или IV квадранте при $|\omega| > |\omega_0|$. Как и в двигательном режиме, увеличение сопротивления цепи якоря увеличивает крутизну характеристики; при этом один и тот же тормозной момент двигатель развивает уже при большей скорости (поэтому на практике режим рекуперативного торможения реализуют без изменения сопротивления силовой цепи).

Характеристика двигателя в этом случае является продолжением механической характеристики в двигательном режиме. Этот способ торможения наиболее экономичен, но доступен лишь в тех системах ЭП, у которых имеется возможность работы со скоростью $\omega > \omega_0$.

Торможение противовключением

Торможение противовключением ДПТ независимого возбуждения может быть получено двумя способами:

- изменением полярности напряжения на обмотке якоря или обмотке возбуждения, т.е. изменение направление вращения. На рис. 3.9. приведен фрагмент схемы включения ДПТ НВ, обеспечивающей реверс напряжения на якоре (рис.3.9).

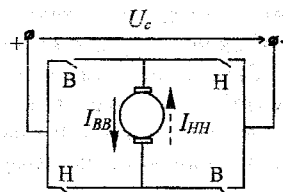


Рис. 3. 9. Реверсивная схема включения ДПТ НВ с реверсором в якорной цепи

- принудительным вращением якоря двигателя в обратную сторону за счет момента нагрузки (рис.3.10).

При подаче на двигатель напряжения обратной полярности (показано пунктиром на схеме замещения (рис. 3.10), ток в цепи якоря изменит свое направление (показано сплошной линией), и момент двигателя станет тормозным).

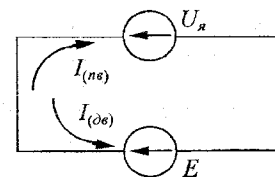


Рис. 3.10. Схема замещения ДПТ НВ в режиме противовключения
Таким образом

$$I_{\text{я}} = \frac{-U_{\text{я}} - E}{R_{\Sigma}} < 0, \quad (3.26)$$

$$M = K\Phi I_{\text{я}} < 0. \quad (3.27)$$

Процесс торможения при изменении полярности напряжения на якоре и диаграмма преобразования мощности представлены на графике (рис. 3.11):

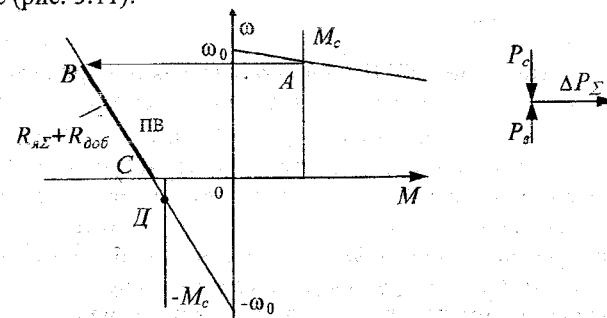


Рис. 3.11. Механическая характеристика ДПТ НВ и диаграмма преобразования мощности для режима противовключения

В момент реверса напряжения на якоре двигателя, в силу инерционности, на той же скорости переходит из двигательного режима (точка А) в режим противовключения (точка В). Торможение в этом режиме (участок характеристики от точки В до точки С) осуществляется до полной остановки двигателя (точка С, которой соответствует режим короткого замыкания ($\omega=0$, $M=M_{\text{кз}}$)). Если в этот момент не отключить двигатель, то в случае, если момент нагрузки реактивный, но меньший по величине чем момент реверса по скорости для $M_{\text{реверса}}$ двигатель начнет вращаться в обратном направлении.

Ток в режиме ПВ в соответствии с (3.26) изменяет свой знак и по величине превышает ток короткого замыкания, поэтому для нормальной работы ЭП необходимо ограничивать ток противовключения введением в силовую цепь добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$. На практике этот режим используют для получения малых скоростей механизмов (в частности, подъемных механизмов).

Торможение противовключением можно реализовать в ЭП, работающем с активным моментом нагрузки, если обеспечить пусковой момент двигателя, меньший момента сопротивления на его валу. На практике это достигается введением большого добавочного сопротивления в силовую цепь, как показано на рис. 3.12.

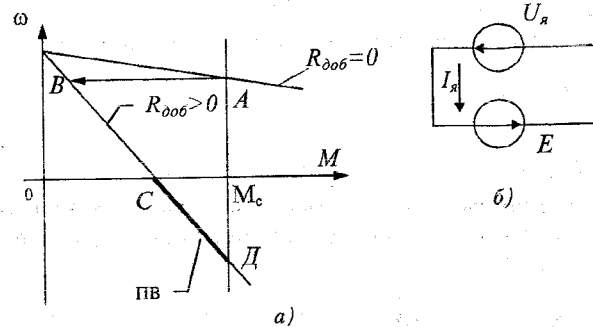


Рис. 3.12. Торможение ДПТ НВ противовключением при введении добавочного сопротивления в цепь якоря (а) и схема замещения (б)

Увеличение сопротивления переводит двигатель на искусственную характеристику с большей крутизной (рис. 3.12, точка В), для которой пусковой момент двигателя значительно меньше статического момента $M_{\text{пуск}} \ll M_c$. В силу этого двигатель начинает замедляться вначале в двигательном режиме до полного останова (точка С), а затем реверсируется по скорости и переходит в режим противовключения. Под действием динамического момента

$$M_{\text{дин}} = M_d - M_c = J \frac{d\omega}{dt} < 0$$

вращение двигателя в обратном направлении происходит с постепенным замедлением до тех пор, пока момент двигателя не станет равным моменту нагрузки (точка Д).

Механическая характеристика двигателя в этом случае будет иметь вид:

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} - \frac{MR_{\Sigma}}{(K\Phi)^2}, \quad (3.28)$$

а ее жесткость определяется величиной добавочного сопротивления, вводимого в якорную цепь.

Режим динамического торможения

Режим динамического торможения возникает при условии, если якорную цепь двигателя отключить от сети (причем двигатель остается возбужденным) и замкнуть на внешнее сопротивление (рис. 3.13).

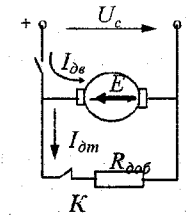


Рис. 3.13. Схема включения якорной цепи ДПТ НВ в режиме динамического торможения

В этом режиме электрическая машина работает как генератор либо за счет кинетической энергии, запасенной во вращающихся частях ЭД и РМ, либо за счет потенциальной энергии опускающегося груза. В обоих случаях генерируемая энергия расходуется на нагрев обмоток якоря и добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$. Причиной, обуславливающей наличие тока в цепи якоря, является э.д.с., величина и знак которой определяются потоком и скоростью вращения машины.

При торможении по инерции, как показано на рис. 3.14,

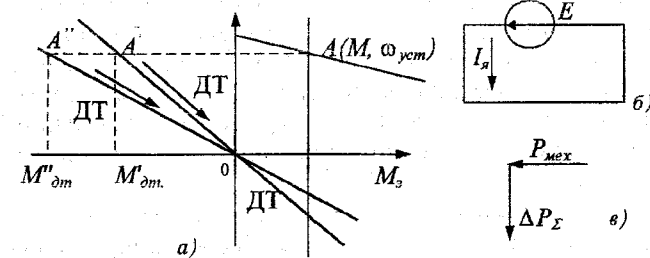


Рис. 3.14. Характеристики ДПТ НВ (а), схема замещения (б) и диаграмма преобразования мощности (в) в режиме динамического торможения.

направление вращения двигателя не меняется, и следовательно, знак э.д.с. сохраняется (рис. 3.14, б). При этом направление тока в обмотке якоря, по отношению к двигательному режиму, изменится на противоположное. Это же видно и из уравнения электрического равновесия, которое в данном случае принимает вид:

$$I_{\text{я}} R_{\Sigma} = 0 - E; \quad I_{\text{я}} = -\frac{E}{R_{\Sigma}}, \quad (3.29)$$

где $R_{\Sigma} = R_{\text{оя}} + R_{\text{доб}}$.

Выражение для скоростной и механической характеристик:

$$\omega = -\frac{I_{\text{я}} R_{\Sigma}}{K\Phi}; \quad (3.30)$$

$$\omega = -\frac{MR_{\Sigma}}{(K\Phi)^2}. \quad (3.31)$$

Несложно видеть, что при токе (моменте), равном нулю, скорость вращения двигателя также становится равной нулю:

$$\omega = \frac{-IR}{K\Phi} = \frac{-MR_{\Sigma}}{(K\Phi)^2} = 0,$$

т.е. характеристики ДПТ НВ в режиме динамического торможения представляют собой прямые линии, расположенные во II или IV квадрантах, проходящие через нуль координатной плоскости. Наклон характеристик при одной и той же нагрузке пропорционален $R_{доб.}$, вводимому в якорную цепь.

Наиболее интенсивное торможение получается при замыкании якоря на коротке (при этом характеристика в динамическом торможении параллельна естественной в двигательном режиме). Однако по условиям нагрева МПТ ток приходится ограничивать введением $R_{доб.}$.

Динамическое торможение может быть использовано для торможения при спуске груза. При этом новый установившийся режим - это точка пересечения характеристик двигателя и РМ. Если двигатель был включен на подъем, то при активной нагрузке перевод его в режим ДТ. будет сопровождаться вначале торможением двигателя при подъеме, а затем (при переходе через 0) его скорость (направление вращения) изменяет свой знак, и двигатель уже разгоняется в режиме ДТ до установившейся скорости. Поэтому для останова двигателя в режиме динамического торможения при $\omega \approx 0$ накладывается механический тормоз.

Если же M_c - реактивный, то торможение осуществляется до $\omega = 0$ и наступает останов, т.к. при $\omega = 0$ M_c тоже становится равным нулю. С энергетической точки зрения, ДТ выгодней чем режим ПВ, однако уступает режиму РТ.

Подводя итог рассмотрению характеристик и режимов работы ДПТ НВ, можно отметить следующее:

- двигатель постоянного тока независимого возбуждения может работать в двигательном и во всех тормозных режимах;
- характеристики двигателя во всех режимах представляют собой прямые линии, причем, если $R_{\Sigma} = const$ и одинаково для всех режимов, то характеристика $\omega = f(M_a)$ представляет собой непрерывную линию для режима рекуперативного торможения, двигательного и противовключения, а характеристика динамического торможения параллельна характеристике для двигательного режима и проходит через точку координатной плоскости.

- жесткость характеристик определяется величиной $R_{доб.}$ в якорной цепи (при условии, что $U_c = const$, $\Phi = const$).

Графически общая картина работы ДПТ НВ во всех режимах работы будет соответствовать рис. 3.15.

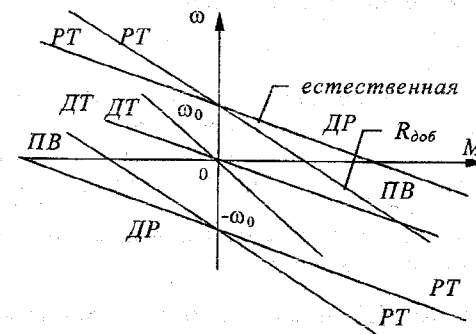


Рис. 3.15. Расположение характеристик ДПТ НВ для различных режимов работы на координатной плоскости

3.5. Способы регулирования скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения

Целый ряд технологических установок рассчитан на работу с возможностью регулирования скорости вращения двигателя системы электропривода.

Регулирование скорости ЭП - это принудительное ее изменение (независимо от нагрузки) либо изменением скорости двигателя за счет изменения параметров двигателя, либо передаточного отношения между ЭД и РМ.

Гораздо шире используется первый способ, т.к. второй - весьма сложен конструктивно, малонадежен и не обеспечивает плавного регулирования скорости.

Регулирование скорости можно выполнять в замкнутых и разомкнутых системах.

В разомкнутых системах это делается в случае, когда нет необходимости поддерживать постоянство скорости при изменении нагрузки или колебаниях параметров самого привода.

Основными показателями регулирования являются :

- жесткость механических характеристик;
- диапазон регулирования;
- плавность регулирования;
- устойчивость привода;
- характер изменения момента на валу двигателя;
- допустимая по условиям нагрева нагрузка;
- экономичность.

Из уравнения механической характеристики

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} - \frac{MR_{\Sigma}}{(K\Phi)^2}$$

следует, что скорость вращения ДПТ НВ можно изменять либо изменением подводимого к якору напряжения U , либо изменением сопротивления якорной цепи R , либо изменением магнитного потока машины Φ . Рассмотрим каждый из способов в отдельности.

3.5.1. Регулирование скорости вращения введением добавочного сопротивления в цепь якоря.

Схема включения ДПТ НВ с добавочным сопротивлением в цепи якоря приведена на рис. 3.16.

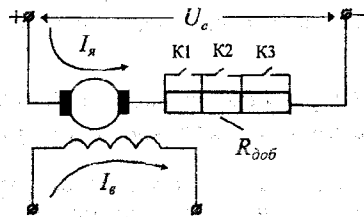


Рис. 3.16. Схема включения ДПТ НВ для регулирования скорости вращения реостатным способом

Реостатные характеристики, полученные в процессе регулирования скорости введением добавочного сопротивления, приведены на рис. 3.17.

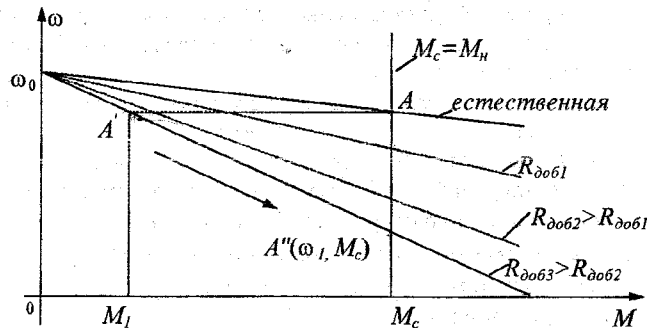


Рис. 3.17. Реостатные характеристики ДПТ НВ.

Двигатель работает в точке A в установившемся режиме с нагрузкой M_c . При введении добавочного сопротивления (например, $R_{доб3}$) скорость двигателя в силу его механической инерционности не может измениться мгновенно, а его момент, согласно выражения

$$M = \frac{U - E}{R + R_{доб}} K\Phi,$$

уменьшится и станет равным M_1 (при этом двигатель перейдет в точку A'). Т.к. $M_a < M_c$, то установившийся режим нарушается и согласно уравнению динамики привод начнет замедляться:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_1 - M_c}{J} < 0.$$

При этом снижение скорости вращения приведет к уменьшению э.д.с. благодаря чему момент двигателя

$$M_{де} = \frac{U - K\Phi\omega}{R + R_{доб3}} K\Phi$$

снова начинает увеличиваться, и новый установившийся режим наступит, когда момент двигателя станет равным моменту нагрузки M_c , но уже при меньшей скорости.

Величина добавочного сопротивления $R_{доб}$, которое необходимо ввести, чтобы получить скорость ω_1 , может быть рассчитана из выражения для скоростной характеристики:

$$\omega_1 = \frac{U - I_a(R_{\Sigma} + R_{доб})}{K\Phi},$$

откуда

$$R_{доб} = \frac{U - K\Phi\omega_1}{I_a} - R_{\Sigma}. \quad (3.32)$$

Добавочное сопротивление должно выбираться для длительного режима работы с пониженной скоростью при полной нагрузке.

Отметим достоинства и недостатки этого способа регулирования скорости.

Так как скорость идеального холостого хода $\omega_0 = \frac{U}{K\Phi}$ не зависит от величины сопротивления силовой цепи, то регулирование скорости этим способом целесообразно только при достаточно больших нагрузках.

Обеспечить достаточно большую плавность регулирования весьма затруднительно в связи с усложнением конструкции регулировочного реостата и системы управления им при большом числе ступеней регулирования.

Жесткость характеристик с увеличением диапазона регулирования снижается и в соответствии с этим возможно появление колебаний скорости при малых скоростях.

Экономичность работы на регулировочных характеристиках весьма низкая, потери мощности возрастают пропорционально относительному снижению скорости (это означает, что если, например, скорость двигателя будет снижена на 50% от значения ω_0 , в сопротивлениях якорной цепи будет потеряно около 50% подводимой мощности).

Так как в процессе регулирования поток двигателя остается неизменным ($\Phi = \text{const}$), то предельно допустимый по нагреву момент

$$M = K\Phi I_n = \text{const} = M_n.$$

Это означает, что рассматриваемый способ относится к способам регулирования с постоянным моментом. Этот способ регулирования можно считать явно неэффективным в силу его существенных недостатков. Используют его исключительно для ограничения токов в процессе запуска двигателя.

3.5.2. Регулирование скорости изменением напряжения на якоре

Данный способ регулирования скорости применяется в системах ЭП с автономными генераторами или при питании двигателя от управляемого статического преобразователя. На рис. 3.18. приведен вид регулировочных характеристик ДПТ НВ при изменении напряжения на якоре:

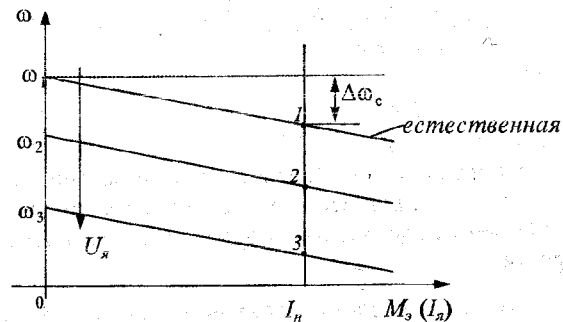


Рис. 3.18. Характеристики ДПТ НВ при изменении напряжения на якоре.

Регулирование скорости вращения двигателя этим способом осуществляется вниз от основной скорости, т.к. согласно ГОСТ отклонение напряжения выше номинального допустимо в пределах 5%, то есть в широких пределах изменение напряжения возможно только вниз от номинального. С учетом того, что в этом случае $\Phi = \text{const}$, по условиям нагрева

$$M = K\Phi I_n = \text{const} = M_n,$$

этот способ относится к способу регулирования скорости с постоянным моментом.

Скорость идеального холостого хода изменяется пропорционально приложенному напряжению, жесткость характеристик остается постоянной (так как статический перепад скорости $\Delta\omega_c$ неизменен), т.е. характеристики параллельны между собой.

Диапазон регулирования можно определить из выражения для $\omega_{\text{ном}}$ и ω_{min} :

$$\omega_n = \frac{U_n - I_n R_a}{K\Phi_n}, \quad \omega_{\text{min}} = \frac{U_{\text{min}} - I_n R_a}{K\Phi_n},$$

откуда

$$D = \frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega_{\text{min}}} = \frac{U_n - I_n R_a}{U_{\text{min}} - I_n R_a}, \quad (3.33)$$

Как следует из выражения (3.33), диапазон регулирования ограничивается в разомкнутых системах в пределах $D = (8 \div 10):1$ из-за увеличения статизма характеристик при снижении напряжения ($\Delta = \frac{\Delta\omega_n}{\omega_0}$). В замкнутых системах возможно получение диапазона

$D = 1000:1$ и более. Плавность регулирования определяется плавностью изменения напряжения питания.

Вследствие малых потерь мощности в цепи якоря этот способ регулирования является экономичным. В целом, это наиболее распространенный способ регулирования скорости двигателей.

В качестве источников постоянного регулируемого напряжения используются либо генераторы постоянного тока, либо полупроводниковые управляемые преобразователи.

3.5.3. Регулирование скорости изменением магнитного потока двигателя

При изменении магнитного потока возможность регулирования скорости вниз от номинальной ограничена явлением насыщения магнитной цепи машины и перегревом обмоток возбуждения, что очевидно из кривой намагничивания машины (рис. 3.19):

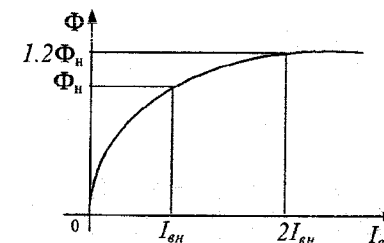


Рис. 3.19. Кривая намагничивания двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Ослабление магнитного потока при регулировании (регулирование скорости вверх от номинальной) также имеет ограничения.

Исходя из того, что в установившемся режиме ток в цепи якоря $I_a = \frac{M_c}{K\Phi}$, можно сделать вывод, что с уменьшением потока машины при работе с заданной нагрузкой ток в якорной цепи возрастает.

Так как при снижении магнитного потока скорость идеального холостого хода двигателя $\omega_0 = \frac{U_n}{K\Phi}$ увеличивается, а ток короткого замыкания при этом остается неизменным, скоростные характеристики будут выходить из одной точки (соответствующей $I_{к.з.}$), а жесткость их будет тем меньше, чем меньше поток (рис. 3.20):

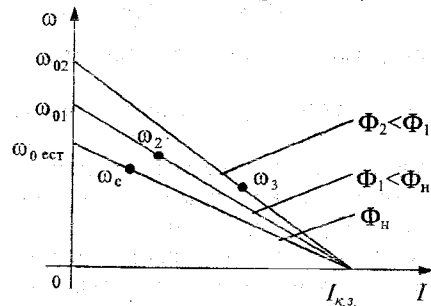


Рис. 3.20. Скоростные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при снижении магнитного потока

В отличие от тока, момент короткого замыкания, определяемый как $M_{к.з.} = k\Phi I_{к.з.}$, при снижении потока уменьшается, что приводит к значительному снижению жесткости механических характеристик. В результате этого снижение магнитного потока при работе двигателя с заданной нагрузкой на валу может привести вначале к увеличению скорости (точки ω_c, ω_2 на рис. 3.21), а затем к ее резкому снижению (точка ω_3):

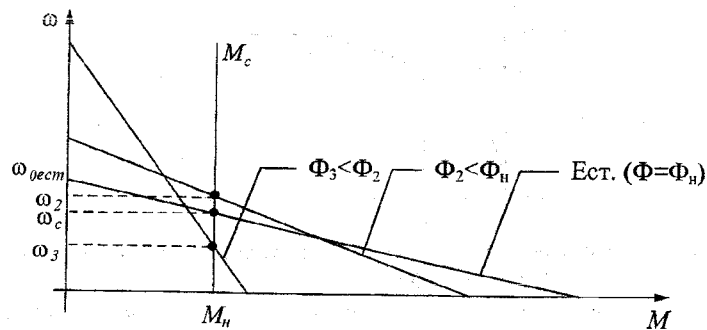


Рис. 3.21. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при снижении магнитного потока двигателя.

Явление уменьшения скорости двигателя при снижении магнитного потока носит название опрокидывания при регулировании потоком.

Из выражения для механической характеристики двигателя скорость вращения

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} - \frac{M_c R_z}{(K\Phi)^2}.$$

Определим условия для опрокидывания регулирования. Взяв первую производную скорости по потоку

$$\frac{d\omega}{d(K\Phi)} = -\frac{U}{(K\Phi)^2} + \frac{2M_c R}{(K\Phi)^3},$$

и приравняв ее к нулю, можно получить соотношение, устанавливающее максимум скорости от потока:

$$K\Phi = \frac{2M_c R}{U_a}, \quad (3.34)$$

т.е. максимальная скорость вращения двигателя для заданной нагрузки M_c может быть достигнута при значении коэффициента потока определяемого (3.34). Другими словами, чем больше M_c , тем меньше будет $\omega_{\max}$, которую можно получить при ослаблении потока (рис. 3.22), и чем меньше напряжение U , тем при меньшей скорости наступает анализируемое явление.

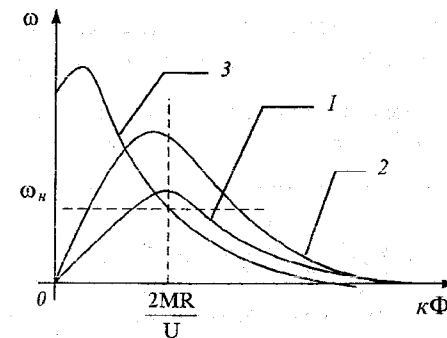


Рис. 3.22. Зависимости изменения скорости вращения двигателя постоянного тока независимого возбуждения при снижении потока для различных моментов нагрузки

(кривая 1- при большом M_c ; 2- при малом M_c ; 3- при $M_c \approx 0$).

Так как магнитная система двигателя в номинальном режиме в значительной степени насыщена, то практически воздействовать на поток можно только в направлении его уменьшения. Осуществляется этот способ путем введения $R_{доб.}$ в цепь возбуждения двигателя..

Основные показатели регулирования при изменении потока:

- для машин нормального исполнения диапазон регулирования

$$D = (1,5 \div 2) : I, \text{ где } \omega_n = I;$$

- так как токи в обмотке возбуждения малы, то не представляет труда осуществить плавное регулирование (при использовании тиристорных возбудителей);

- способ является экономичным, т.к. потери по отношению к номинальным изменяются несущественно;

- жесткость характеристик снижается пропорционально величине потока;

- так как момент двигателя в данном случае $M = K\Phi I_a$, то это означает, если с увеличением скорости момент уменьшается, а данный способ можно отнести к способу регулирования с постоянной мощностью;

- диапазон изменения скорости при изменении магнитного потока является ограниченным; практически скорость можно изменить до +20% от ω_n ;

- с точки зрения затрат на оборудование этот способ наиболее предпочтителен ввиду малой мощности источника питания обмотки возбуждения.

На практике этот способ используют как вспомогательный и применяют для регулирования скорости вверх от ω_n совместно с регулированием напряжения на якоре.

3.6. Характеристики и режимы работы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Нормальная схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТ ПВ) приведена на рис. 3.23:

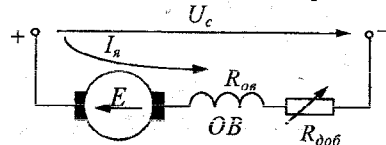


Рис. 3.23. Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Характерной особенностью ДПТ ПВ является то, что ОБ включена последовательно в цепь якоря и поэтому ток якоря одновременно является и током возбуждения, следовательно, магнитный поток машины также является величиной переменной, зависящей от тока нагрузки (для сравнения: в ДПТ НВ поток не зависит от нагрузки).

Зависимость потока ДПТ ПВ от тока возбуждения носит название характеристики намагничивания:

$$\Phi = f(I_a). \quad (3.35)$$

Эта характеристика (рис. 3.24) не имеет аналитического выражения и вид ее зависит от материала, из которого изготовлен якорь и его конструкции:

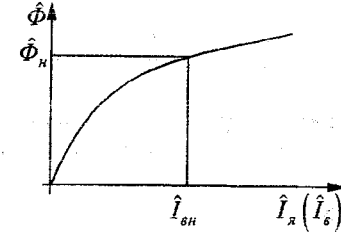


Рис. 3.24. Характеристика намагничивания ДПТ ПВ.

Кривая намагничивания обычно приводится в справочных данных на ДПТ ПВ.

Схема замещения для ДПТ ПВ (рис. 3.25) может быть представлена в том же виде, что и для якорной цепи ДПТ НВ, с той лишь разницей, что в общее сопротивление силовой цепи добавляется еще и сопротивление обмотки возбуждения $R_{об}$.

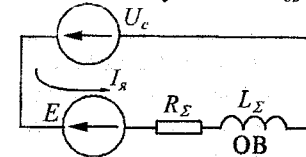


Рис. 3.25. Схема замещения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

На рис.3.25: $R_{\Sigma} = R_{я\Sigma} + R_{об} + R_{доб}$; $L_{\Sigma} = R_{я\Sigma} + L_{об}$.

Для ДПТ ПВ остаются справедливыми уравнения для э.д.с. и момента двигателя, но уже при условии, что $\Phi = f(I_a) = f(I_{\phi})$, $E = k\Phi(I_a) \cdot \omega$, $M_{об} = k\Phi(I_a) \cdot I_a$.

Составим уравнение электрического равновесия для схемы замещения ДПТ ПВ (в статическом режиме):

$$U_c = I_a R_{\Sigma} + k\Phi(I_a) \cdot \omega. \quad (3.36)$$

Как видно из этого уравнения, в отличие от ДПТ НВ в данном случае из этого уравнения нельзя получить аналитические выражения для скоростной и механической характеристик, т. к. поток и ток (как видно из кривой намагничивания на рис. 3.24) связаны между собой нелинейной зависимостью, которую, как правило, невозможно представить аналитическим выражением. Уравнения электромеханических и механических характеристик ДПТ ПВ не отличаются от соответствующих выражений для ДПТ НВ:

$$\omega = \frac{U_c}{\kappa \Phi(I_a)} - \frac{I_a R_\Sigma}{\kappa \Phi(I_a)}; \quad (3.37)$$

$$\omega = \frac{U_c}{\kappa \Phi(I_a)} - \frac{M \cdot R_\Sigma}{[\kappa \Phi(I_a)]^2}, \quad (3.38)$$

где $\kappa \Phi(I_a)$ - непрерывно изменяющийся в зависимости от нагрузки поток машины.

В первом приближении кривую намагничивания можно аппроксимировать ломаной, состоящей из двух участков, как показано на рис. 3.26.

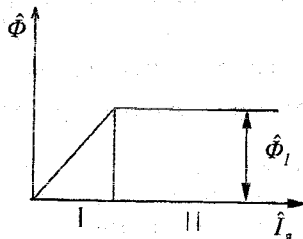


Рис. 3.26. Аппроксимация кривой намагничивания ломаной

Первый участок (I) соответствует области ненасыщенной магнитной системы, а второй (II) - насыщенной. Для I-го участка можно считать $\Phi = \alpha I_a$, а для II-го участка - $\Phi = \text{const} = \Phi_1$. Тогда уравнение электромеханической характеристики для I-го участка можно представить следующим образом:

$$\omega = \frac{U_c}{\alpha I_a} - \frac{I_a R_\Sigma}{\alpha I_a} = \frac{U_c}{\alpha I_a} - \frac{R_\Sigma}{\alpha}, \text{ или } \omega = \frac{A}{I_a} - B, \quad (3.39)$$

где $A = \frac{U_c}{\alpha}$; $B = \frac{R_\Sigma}{\alpha}$.

Момент двигателя на I-м участке пропорционален квадрату тока якоря:

$$M = \kappa \Phi(I_a) \cdot I_a = \alpha I_a \cdot I_a = \alpha I_a^2, \quad (3.40)$$

откуда

$$I_a = \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{\alpha}} \quad (3.41)$$

Подставляя (3.41) в (3.39), получаем выражение для механической характеристики ДПТ ПВ:

$$\omega = \frac{U\sqrt{\alpha}}{\alpha \cdot \sqrt{M}} - \frac{\sqrt{M} \cdot R_\Sigma \cdot \sqrt{\alpha}}{\sqrt{\alpha} \cdot \alpha \cdot \sqrt{M}} = \frac{D}{\sqrt{M}} - B, \quad (3.42)$$

где $D = \frac{U\sqrt{\alpha}}{\alpha}$; $B = \frac{R_\Sigma}{\alpha}$.

Таким образом, при сделанном выше допущении механическая характеристика ДПТ ПВ имеет вид гиперболы. Одной из асимптот ее является ось ординат, а другой - прямая, параллельная оси абсцисс, уравнение которой $\omega = -B$.

Жесткость механической характеристики изменяется и возрастает с увеличением нагрузки. Вид механической и скоростной характеристик, представленных зависимостями (3.37) и (3.38), приведен на рис. 3.27 и справедлив только для области ненасыщенной магнитной системы двигателя. Как правило, современные двигатели имеют насыщенные магнитные системы даже в номинальном режиме, поэтому пропорциональность между током якоря и потоком возбуждения нарушается и в результате этого характеристики из гиперболических становятся близкими к линейным. Гиперболическая зависимость сохраняется лишь на участках малых нагрузок.

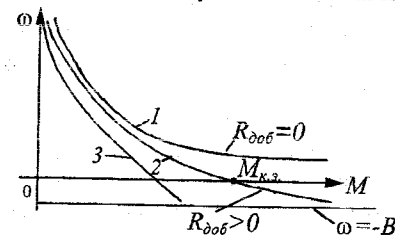


Рис. 3.27. Механические характеристики ДПТ ПВ

Хотя квадратичная зависимость между моментом и током двигателя в области насыщенной магнитной системы не сохраняется, тем не менее, степень этой зависимости остается не ниже 1.2-1.4 (т.е. $M_o = \alpha I_a^{(1.2+1.4)}$), что является весьма ценным качеством этих двигателей при пусках и перегрузках.

При одном и том же пусковом токе ДПТ ПВ развивает больший пусковой момент, чем ДПТ НВ: если $I_{пуск} = (2.0 \dots 2.5) I_n$, то $M_{пуск} = (2.4 \dots 3.0) M_n$.

Это обусловлено тем, что при пусковом токе магнитный поток становится уже больше номинального и, следовательно, $M = \kappa \Phi(I_{пуск}) \cdot I_{пуск}$ больше чем $\kappa \Phi(I_n) \cdot I_{пуск}$. Момент ДПТ ПВ не зависит от колебаний напряжения сети, т.к. магнитный поток зависит только от тока якоря.

Основные области применения: тяговые электроприводы, электроприводы механизмов передвижения, подъема и др. Как следует из уравнений (3.37) и (3.38), при малых нагрузках двигатель развивает большую скорость, поскольку с уменьшением тока якоря уменьшается магнитный поток. Так, в режиме идеального холостого хода, когда $M=0$; $I_a=0$, скорость двигателя теоретически равна бесконечности. Из-за наличия механических потерь в двигателе

и остаточного намагничивания полюсов в действительности скорость идеального холостого хода двигателя ограничена и достигает $(5...6)\omega_n$ ($\omega = \frac{U}{k\Phi_{ост}}$). Однако, даже при такой скорости двигатель может выйти из строя, т.к. он не рассчитан на работу с такими центробежными нагрузками. Поэтому для рабочих машин, имеющих холостой ход или очень малую нагрузку, применять ДПТ ПВ в качестве приводных двигателей нецелесообразно. Кроме того, ДПТ ПВ нецелесообразно применять в установках, имеющих ременные передачи, допускающие проскальзывание, или передачи, в которых кинематическая связь может легко нарушиться (например, цепные или фрикционные).

Точка короткого замыкания ($I_{к.з.}$ или $M_{к.з.}$) и область противовключения для естественной характеристики, которой соответствует кривая (1) на рисунке 3.27, лежит далеко за пределами номинальной нагрузки. Несложно видеть, что при увеличении R_z жесткость характеристик будет изменяться (уменьшаться) и точки к.з. приобретут конкретные, допустимые по перегрузочной способности значения.

Аналитические выражения характеристик ДПТ ПВ справедливы только для двигателей с ненасыщенной магнитной системой. Для более точного их расчета на практике обычно необходимо располагать зависимостями

$$\hat{\omega}_e = f_1(\hat{I}_a); \quad (3.43)$$

$$\hat{M}_e = f_2(\hat{I}_a), \quad (3.44)$$

которые задаются в каталогах в виде графиков. С помощью этих характеристик нетрудно построить естественную механическую характеристику $\omega_e = f(M)$. Для двигателей различной мощности и скорости, относящихся к одной серии, характеристики $\hat{\omega}_e = f_1(\hat{I}_a)$ в относительных единицах практически совпадают. Также совпадают и зависимости $\hat{M}_e = f_2(\hat{I}_a)$. Поэтому характеристики всех двигателей данной серии могут быть представлены этими двумя кривыми в относительных единицах, которые называют *универсальными*.

Универсальные характеристики справедливы для ДПТ ПВ малой и средней мощности. Для двигателей большой мощности, как правило, приводится зависимость $k\Phi = f(I_a)$, представленная заводом-изготовителем в документации.

Примерный вид этих характеристик (например, для тяговых двигателей серии ДК), применяемых в рудничных электровазах, приведен на рис. 3.28.

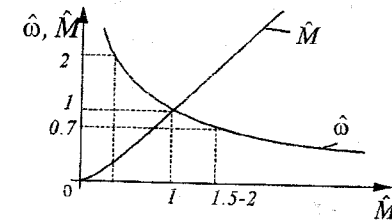


Рис. 3.28. Универсальные характеристики для тяговых двигателей последовательного возбуждения серии ДК

На характеристиках, приведенных в каталогах, а также на универсальных характеристиках, как правило, указан *вращающий момент на валу*, а не *электромагнитный момент двигателя*. Пользуясь этими характеристиками, при наличии паспортных данных на машину весьма просто произвести расчет естественной характеристики.

3.6.1. Расчет естественной механической характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Для расчета характеристики используются паспортные данные двигателя — параметры ω_n , M_n , $I_{aн}$. Расчет производится графическим методом.

Задавая величиной $\hat{I}_a$ по выражению $I_a = \hat{I}_a \cdot I_{aн}$ определяют соответствующие значения тока $I_a = I_n$ в абсолютных единицах. Для каждого заданного значения тока $\hat{I}_a$ из универсальной кривой $\hat{\omega}_e = f_1(\hat{I}_a)$ определяют соответствующие значения $\hat{\omega}_e$ и по формуле $\omega_e = \hat{\omega}_e \cdot \omega_n$ находят значения этого параметра в абсолютных единицах. Таким образом получают данные для электромеханической характеристики ДПТ ПВ $\omega_e = f(I_a)$ (график имеет точно такой вид, как и универсальной кривая, но только в другом масштабе).

Для построения механической характеристики необходимо из универсальной кривой $\hat{M}_e = f_2(\hat{I}_a)$ для заданных значений $\hat{I}_a$ определить соответствующие значения $\hat{M}_e$ и выполнить пересчет по формуле $M_e = \hat{M}_e \cdot M_n$, а затем построить график $\omega_e = f(M_e)$.

Другим способом расчета, как естественных так и искусственных скоростных и механических характеристик, является использование аналитических зависимостей (3.37) и (3.38), и предварительно рассчитанной кривой намагничивания $k\Phi(I_a)$.

Порядок расчета характеристик

Задаваясь различными значениями $\hat{I}_{я}$, по универсальным кривым $\hat{\omega}_e = f(\hat{I}_{я})$ определяют соответствующие значения $\hat{\omega}_{ei}$, и используя формулы $\omega_e = \hat{\omega}_e \cdot \omega_H$, $I_{я} = \hat{I}_{я} \cdot I_{яH}$, производят пересчет параметров $I_{я}$ и ω_e в абсолютные единицы.

По формуле

$$\omega_e = \frac{U_H - I_{я} R_{я\pi}}{k\Phi(I_{я})}; \quad k\Phi(I_{я}) = \frac{U_H - I_{я} R_{я\pi}}{\omega_e},$$

определяют значение $k\Phi(I_{я})$ для различных значений $I_{я}$ и строят кривую $k\Phi(I_{я})$.

Используя формулы (3.37) и (3.38), рассчитывают естественную или искусственную характеристики для различных значений $I_{я}$ (причем, параметр $k\Phi(I_{я})$ берется из расчетной кривой намагничивания).

3.6.2. Искусственные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Работа двигателя последовательного возбуждения, как и любого другого, на искусственных характеристиках возможна тогда, когда хотя бы один из его параметров отличается от номинального. Это может быть достигнуто одним из способов:

- изменением напряжения, подводимого к якорной цепи двигателя;
- введением в цепь якоря добавочного сопротивления;
- изменением магнитного потока двигателя.

Расчет искусственных характеристик ДПТ ПВ независимо от способа их получения выполняется по уравнениям для э.д.с. и момента двигателя:

$$\omega_u = \frac{E_u}{k\Phi(I_{я})};$$

$$E_u = k\Phi(I_{я}) \cdot \omega_u; \quad (3.45)$$

$$M_{я} = k\Phi(I_{я}) \cdot I_{я}, \quad (3.46)$$

($k\Phi(I_{я})$ рассчитывается по универсальной кривой $\omega(I_{я})$).

3.6.2.1. Искусственные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при введении в цепь якоря добавочного сопротивления

Уравнение скоростной и механической характеристики двигателя при введении добавочного сопротивления в якорную цепь имеет тот же вид, что и для естественной характеристики:

$$\omega_u = \frac{U_H}{k\Phi(I_{я})} - \frac{I_{я} \cdot (R_{я\pi} + R_{доб} + R_{об})}{k\Phi(I_{я})}, \quad (3.47)$$

где $R_{доб}$ - заданное добавочное сопротивление.

Порядок расчета характеристик

По универсальной кривой $\hat{\omega}_e = f(\hat{I}_{я})$ определяют значение $\hat{\omega}_{ei}$ для ряда значений $\hat{I}_{я}$.

Рассчитывают кривую намагничивания $k\Phi(I_{я})$ по формуле

$$k\Phi(I_{я}) = \frac{U_H - I_{я} \cdot (R_{я} + R_{об})}{\omega_e}.$$

В соответствии с зависимостью (3.47) для заданного $R_{доб}$ рассчитывают скоростные и механические характеристики (рис. 3.29):

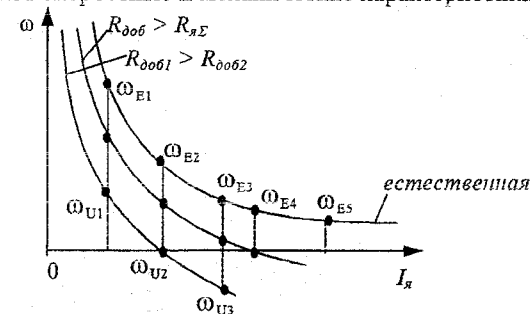


Рис. 3.29. Реостатные характеристики ДПТ ПВ

Примечание: используя выражения (3.47), можно решить и обратную задачу - найти $R_{доб}$, если известно ω_u и ток якоря.

Анализируя характеристики, полученные при введении $R_{доб}$, можно отметить следующее:

- при малых нагрузках независимо от величины добавочного сопротивления $\omega_{0и} \rightarrow \infty$;
- жесткость характеристик снижается с увеличением $R_{доб}$;
- диапазон регулирования скорости при введении $R_{доб}$ не превышает 2.5:1 и зависит от нагрузки.

Кроме аналитического метода расчета искусственных характеристик при введении $R_{доб}$, последние можно рассчитать и построить графическим способом.

3.6.2.2. Искусственные характеристики при изменении напряжения на якоре

Выражение для скоростной характеристики ДПТ ПВ при изменении напряжения на якоре можно получить следующим образом:

$$\frac{\omega_u}{\omega_e} = \frac{U_1 - I_{я} \cdot R_{я\pi}}{U_H - I_{я} \cdot R_{я\pi}}; \quad \omega_u = \omega_e \cdot \frac{U_1 - I_{я} \cdot R_{я\pi}}{U_H - I_{я} \cdot R_{я\pi}}, \quad (3.48)$$

где U_1 - отличное от номинального напряжение, прикладываемое к якорю.

Анализируя эту зависимость можно сделать следующие выводы:

- чем меньше напряжение на якоре, тем ниже по отношению к естественной располагается искусственная характеристика (т.е. при уменьшении напряжения уменьшается ω_u);

- характеристики при изменении напряжения параллельны между собой, т.к. статическое падение скорости во всех случаях одинаково $\Delta\omega_c = \frac{I_a \cdot R_{я}}{\kappa\Phi(I_a)}$ (для одинаковых значений токов);

- при уменьшении тока в цепи якоря скорость двигателя стремится к бесконечности, т.е. и в данном случае невозможен режим идеального холостого хода.

Вид скоростных характеристик при изменении напряжения на якоре приведен на рис. 3.30.

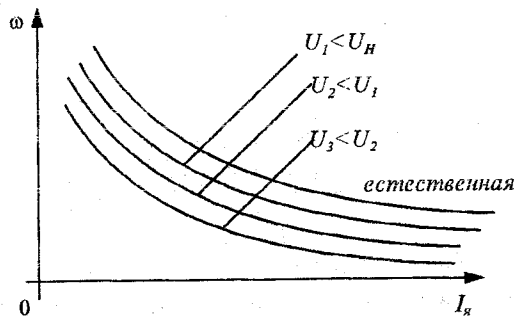


Рис. 3.30. Скоростные характеристики ДПТ ПВ при изменении напряжения на якоре

3.6.2.3. Искусственные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при шунтировании обмотки возбуждения

ДПТ ПВ представляет собой универсальную машину, позволяющую получить большое разнообразие искусственных механических характеристик с помощью различных способов включения ОВ и якоря в комбинации с соответствующими сопротивлениями (так называемые шунтирующие контуры).

Рассмотрим схему включения ДПТ ПВ с шунтированием ОВ (рис. 3.31).

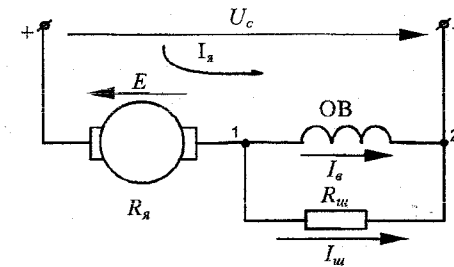


Рис. 3.31. Схема ДПТ ПВ с шунтированием обмотки возбуждения

Как видно из схемы, при введении в силовую цепь сопротивления $R_{ш}$ (шунта), включаемого параллельно ОВ, ток возбуждения будет отличаться от тока якоря, и его величина будет зависеть от сопротивления шунта $R_{ш}$. Чем меньше $R_{ш}$, тем меньший ток будет проходить через ОВ, следовательно, тем меньший магнитный поток $\Phi(I_a)$ будет наводиться в машине.

Исходными уравнениями, описывающими такую схему, являются:

- уравнение электрического равновесия

$$U_c = I_a R_{я} + I_{ш} R_{ш} + E_u \quad (3.49)$$

где E_u - э.д.с. в искусственной схеме включения;

- уравнение э.д.с.

$$E_u = \kappa\Phi(I_a) \cdot \omega_u \quad (3.50)$$

- уравнение токов

$$I_a = I_{я} + I_{ш} \quad (3.51)$$

Расчет искусственных характеристик производится по общей методике, а именно:

- задаваясь различными значениями тока возбуждения (I_a), с помощью универсальных кривых и паспортных данных двигателя определяют зависимость $\kappa\Phi(I_a)$ по формуле:

$$\kappa\Phi(I_a) = \frac{U_H - I_B \cdot (R_{я} + R_{ОВ})}{\omega_e};$$

- определяют величину э.д.с. двигателя E_u в искусственной схеме включения

$$E_u = U_c - I_a R_{я} - I_{ш} R_{ш},$$

где $I_{я} = I_B + I_{ш} = I_B + I_B \cdot \frac{R_B}{R_{ш}};$

- определяют угловую скорость вращения ω_u по формуле

$$\omega_u = \frac{E_u}{\kappa\Phi(I_a)} \text{ и строят зависимость } \omega_u = f_1(I_a);$$

- определяют значения момента двигателя в искусственной схеме включения для различных I_a

$$M = k\Phi(I_a) \cdot I_a,$$

где значения I_a рассчитаны для соответствующих значений I_e .

Так как включение $R_{ш}$ параллельно ОВ приводит к уменьшению магнитного потока машины по отношению к его величине в нормальной схеме включения, то естественно предположить, что при $U_c = \text{const}$ в этом случае можно получить семейство скоростных характеристик, расположенных выше естественной. Общий вид характеристик при этом не изменяется, т.е. они будут смещаться вверх от естественной (рис. 3.32).

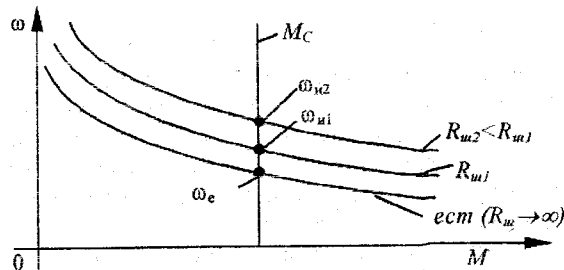


Рис. 3.32. Скоростные характеристики ДПТ ПВ в схеме с шунтированием обмотки возбуждения

Механические характеристики в рассматриваемой схеме включения имеют вид, показанный на рис. 3.33:

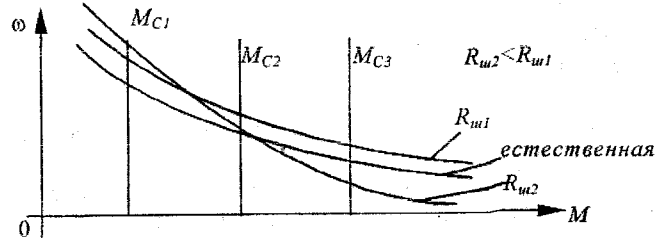


Рис. 3.33. Механические характеристики ДПТ ПВ в схеме с шунтированием обмотки возбуждения

Из рисунка видно, что с уменьшением $R_{ш}$ (т.е. с уменьшением $\Phi(I_a)$), модуль жесткости механических характеристик снижается, так как с уменьшением потока статическое падение скорости увеличивается, а это значит, что использовать такую схему включения с целью регулирования скорости привода выше основной во избежание опрокидывания можно лишь в ограниченном диапазоне нагрузок.

3.6.2.4. Характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при шунтировании якоря

Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приведена на рис. 3.34.

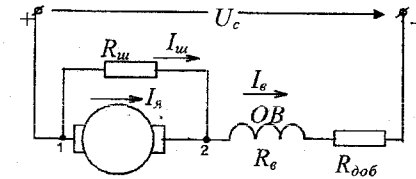


Рис. 3.34. Схема ДПТ ПВ с шунтированием якоря

В данной схеме ток в обмотке возбуждения определяется как сумма токов $I_e = I_a + I_{ш}$ и для его ограничения вводится включаемое последовательно с обмоткой возбуждения добавочное сопротивление $R_{доб}$. Наличие шунтирующего контура создает возможность протекания тока по обмотке возбуждения даже при отсутствии последнего в цепи якоря (действительно, при $R_{ш} = 0$ весь ток практически идет через шунт в обмотку возбуждения, а в якорной обмотке он при этом равен нулю). Это обстоятельство обеспечивает возможность работы двигателя в данной схеме на холостом ходу (что в любой другой схеме ДПТ ПВ невозможно). Увеличение магнитного потока за счет влияния тока шунтирующего контура, а также значительное падение напряжения от этого тока на последовательном сопротивлении $R_{доб}$ приводит к значительному снижению скорости.

Вид механических характеристик в рассматриваемой схеме показан на рис. 3.35.

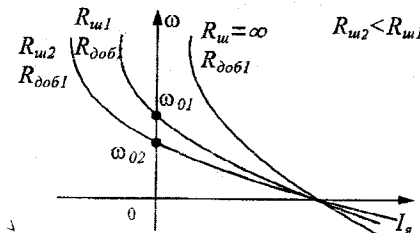


Рис. 3.35. Механические характеристики ДПТ ПВ в схеме с шунтированием якоря

Как видно из рисунка, увеличение $R_{ш}$ сдвигает характеристику вниз и влево во II квадрант. Очевидно, что идеальный холостой ход будет иметь место, когда $E_{доб} = I_{ш} R_{ш}$. При дальнейшем увеличении скорости якорь совместно с сетью начинает питать шунтирующий контур, вследствие чего ток в нем увеличивается. Соответственно увеличивается падение напряжения в этом контуре ($I_{ш} R_{ш}$), а следовательно, уменьшается и поток в обмотке возбуждения. Поэтому при некоторой скорости тормозной момент достигает максимума, а затем при дальнейшем ее увеличении начинает уменьшаться (характеристики круто загнаны вверх). Из характеристик видно, что при уменьшении $R_{ш}$ уменьшается пусковой момент ($M_{пуск}$), а жесткость характеристик возрастает.

Расчет характеристик двигателей постоянного тока последовательного возбуждения при шунтировании якоря

Используя паспортные данные машины и универсальную характеристику $\hat{\omega}_e = f(I_a)$, определяют значения ω_e для произвольно выбранных значений I_a (он же I_e в естественной схеме включения). По формуле

$$K\Phi(I_a) = \frac{U_n - I_a \cdot R_{\Sigma}}{\omega_e}$$

рассчитывают кривую намагничивания, задаваясь различными значениями I_a .

Определяют напряжение на якоре

$$U_{1,2} = U_c - I_e (R_{\Sigma} + R_{\partial\partial\partial})$$

и ток шунта: $I_{\text{ш}} = \frac{U_{1,2}}{R_{\text{ш}}}$

Определяют ток якоря: $I_a = I_e - I_{\text{ш}}$.

Определяют э.д.с. двигателя: $E_n = U_{1,2} - I_a R_a$.

Рассчитывают зависимости $\omega = f(I_a)$ и $\omega = f(M)$.

3.6.2.5. Комбинированные схемы включения двигателей постоянного тока последовательного возбуждения с шунтирующими контурами

Такой схемой может служить схема ДПТ ПВ с параллельным включением якоря и ОВ при наличии добавочного сопротивления (рис. 3.36).

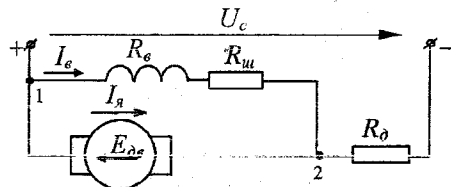


Рис. 3.36. Комбинированная схема включения ДПТ ПВ

В данном случае расчет характеристик двигателя осуществляется по той же методике, что и в предыдущих случаях, т.е. основной задачей расчета является нахождение э.д.с. двигателя, по значению которой с учетом кривой намагничивания, полученной расчетным путем, можно определить ряд точек ω_1 , принадлежащих искусственным характеристикам.

Характеристики двигателя в такой схеме имеют вид, приведенный на рис. 3.37.

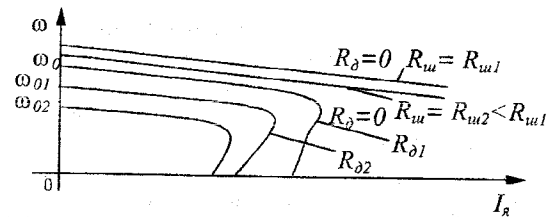


Рис. 3.37. Механические характеристики ДПТ ПВ в комбинированной схеме включения

Из рисунка видно, что при отсутствии R_{∂} , включенного последовательно, схема двигателя ничем не отличается от схемы ДПТ НВ с параллельным возбуждением и его характеристики представляют собой прямые линии, причем, чем меньше R_{Σ} , тем выше их жесткость и тем меньше скорость вращения двигателя.

В случае, если $R_{\partial} \neq 0$, двигатель оказывается подключенным к части делителя напряжения, образованного R_{Σ} и R_{∂} . Параллельный контур возбуждения обеспечивает наличие магнитного потока при токе якоря, равном нулю, благодаря чему существует скорость идеального холостого хода и возможность перехода в генераторный режим. При этом, за счет дополнительного падения напряжения на R_{∂} напряжение на якоре несколько снижается, а следовательно снижается и ω_0 .

3.7. Тормозные режимы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения могут работать как в двигательном, так и в тормозных режимах. Однако, возможности ДПТ ПВ в части создания тормозных режимов более ограничены, чем у ДПТ НВ. Так, например, режим рекуперативного торможения для ДПТ ПВ в нормальной схеме включения (т.е. при отсутствии шунтирующих контуров) практически не может быть реализован по двум причинам. Во-первых, при уменьшении момента и переходе в режим холостого хода скорость двигателя может достичь недопустимых по условиям прочности механических частей пределов. Во-вторых, при изменении направления тока якоря одновременно изменяется и направление магнитного потока. Поэтому, для сохранения знака м.д.с. при переходе в генераторный режим необходимо переключение концов обмотки возбуждения, что связано с усложнением схемы включения двигателя.

Однако, как уже рассматривалось ранее, в схеме с шунтированием якоря (рис. 3.35) могут быть созданы условия, за счет соответствующего выбора $R_{\text{ш}}$, обеспечивающие протекание тока в обмотке возбуждения при отсутствии его в якорной обмотке. Это

обстоятельство не только обеспечивает возможность работы двигателя на холостом ходу, но в известных пределах допускает работу в тормозном режиме (однако, не следует забывать, что увеличение магнитного потока за счет влияния тока шунтирующего контура, а также дополнительное падение напряжения от этого тока в добавочном сопротивлении $R_{доб}$, приводят к резкому снижению скорости). Несложно видеть, что режим идеального холостого хода в этой схеме будет иметь место, когда $E_{\partial\partial} = I_{ш}R_{ш}$, где $I_{ш}$ - ток, который в данном случае протекает через шунт, обмотку возбуждения и добавочное сопротивление. При дальнейшем увеличении скорости вращения двигателя (за счет нагрузки) якорь совместно с сетью начинает питать шунтирующий контур, от чего ток в нем еще больше увеличивается. При этом падение напряжения $\Delta U_{ш} = I_{ш}R_{ш}$ также возрастает, что приводит уже к ослаблению магнитного потока. Поэтому при некоторой скорости тормозной момент достигает максимума, а затем при дальнейшем ее увеличении начинает уменьшаться. При этом работа ДПТ ПВ становится неудовлетворительной. Следует помнить, что этот режим не является рекуперативным торможением.

Что же касается двух других тормозных режимов - противовключения и динамического торможения - то они вполне приемлемы для ДПТ ПВ как и для других типов электрических машин.

3.7.1. Торможение противовключением

Этот режим для ДПТ ПВ является основным тормозным режимом и находит широкое применение как в механизмах с потенциальным статическим моментом (механизмы подъема), так и в механизмах с реактивным статическим моментом (механизмы передвижения и др.).

Возможны два способа осуществления режима противовключения:

- путем изменения полярности напряжения на зажимах якоря;
- при наличии активной нагрузки, когда $M_c > M_{к.д}$ двигателя, благодаря чему двигатель, включенный на одно направление вращения, под действием превосходящего статического момента M_c начинает вращаться в обратном направлении (электромагнитный тормоз).

При торможении первым способом необходимо иметь возможность изменить направление тока только в обмотке якоря, оставив без изменения направление тока в ОВ, как показано на рис. 3.38.

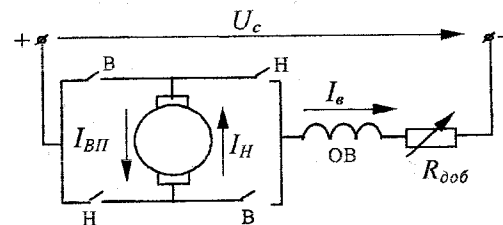


Рис. 3.38. Схема включения ДПТ ПВ для режима противовключения

При торможении ДПТ ПВ противовключением для ограничения тока должно быть введено добавочное сопротивление, величина которого может быть определена следующим образом. Задавшись значением начального тормозного тока (тока броска) $I_{я.макс} = 2..2,5(I_{я.ном})$, из уравнения электрического равновесия для режима противовключения определяют $R_{доб}$:

$$-U_c = -I_{я} \cdot (R_{я} + R_{в} + R_{доб}) + E; \quad (3.52)$$

$$R_{доб} = \frac{U_c + k\Phi(I_{я.макс}) \cdot \omega_c}{I_{я.макс}} - (R_{я} + R_{в}),$$

где ω_c - скорость в предшествующем двигательном режиме.

Вид скоростной (или механической) характеристики двигателя в режиме противовключения приведен на рис. 3.39.

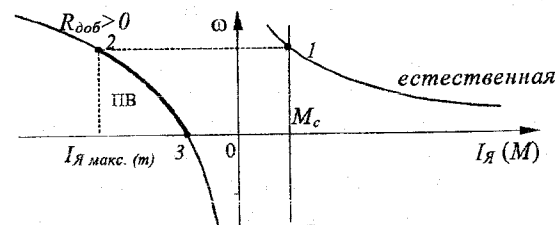


Рис. 3.39. Характеристика ДПТ ПВ в режиме противовключения

Режиму противовключения соответствует участок 2-3 искусственной характеристики. При достижении скорости вращения $\omega=0$ во избежание аварийного режима двигатель отключают от сети.

В случае реактивного момента на валу в процессе торможения противовключением (если двигатель не отключить от сети при $\omega=0$) произойдет реверс по скорости и двигатель начнет вращаться в обратном направлении, пока не достигнет скорости вращения, соответствующей точке 4 (рис. 3.40):

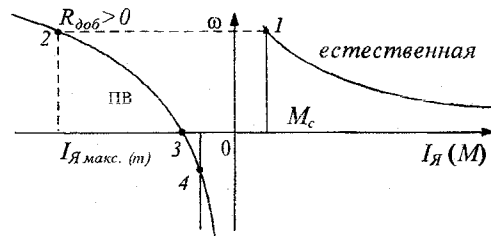


Рис. 3.40. Противовключение ДПТ ПВ с последующим реверсом по скорости (для случая реактивного момента на валу)

Второй способ торможения противовключением, как и для ДПТ НВ, применяется для спуска грузов с пониженной скоростью. При этом двигатель включается на подъем груза, но в цепь якоря вводится такое $R_{доб}$, чтобы обеспечить принудительное вращение в обратном направлении (рис. 3.41).

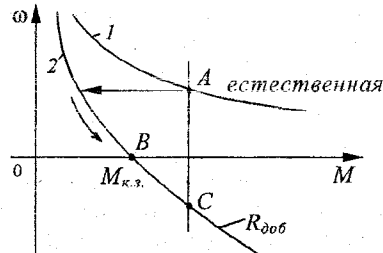


Рис. 3.41. Торможение противовключением с активным моментом на валу

При этом двигатель переходит на характеристику 2, замедляет вращение (подъем с замедлением) и останавливается в т.В, после чего реверсируется по скорости и переходит в режим противовключения (участок В-С). В точке С $M_0 = M_c$, что соответствует установившемуся режиму (спуск в режиме противовключения с $\omega = const$). Перемена знака скорости соответствует изменению знака э.д.с., т.е. последняя уже направлена согласно с вектором напряжения сети (условие режима ПВ). Уравнение электрического равновесия будет иметь вид:

$$U_c = I_a(R_a + R_g + R_{доб}) - E. \quad (3.53)$$

Выражение для тока в соответствии с (3.53):

$$I_a = \frac{U_c + E}{R_a + R_g + K_{доб}} \quad (3.54)$$

показывает, что ток якоря остается положительным. Но так как скорость вращения двигателя $\omega < 0$, то электромагнитная мощность двигателя

$$P = \kappa \Phi(I_a) \omega < 0.$$

Таким образом, и в данном случае двигатель потребляет мощность как от сети, так и с вала и со стороны вала целиком расходует ее на потери в системе привода.

3.7.2. Режим динамического торможения двигателей постоянного тока последовательно возбуждения

Динамическое торможение ДПТ ПВ может быть осуществлено двумя способами:

- с самовозбуждением двигателя;
- с независимым возбуждением двигателя.

3.7.2.1. Торможение с самовозбуждением

Способ динамического торможения с самовозбуждением широко применяется на практике, т.к. он не требует питания обмоток двигателя от сети, что является обязательным условием для схем аварийного торможения.

Сущность этого способа торможения заключается в том, что двигатель отключают от сети и замыкают на тормозное сопротивление $R_{дт}$, оставляя в якорной цепи обмотку возбуждения. При этом двигатель работает в режиме генератора с самовозбуждением, как показано на соответствующей схеме включения (рис. 3.42).

При работе в двигательном режиме контакт ДТ разомкнут, а контакты Л замкнуты. При этом ток направлен встречно э.д.с. (показано пунктирной стрелкой).

При переводе двигателя в режим динамического торможения с самовозбуждением контакты Л размыкают (двигатель оказывается отключенным от сети), а контакты ДТ замыкают.

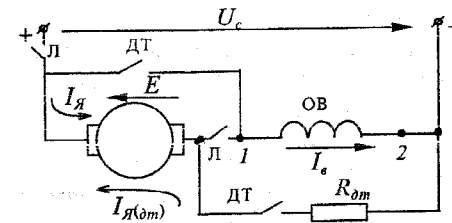


Рис. 3.42. Схема включения ДПТ ПВ в режиме динамического торможения с самовозбуждением

При вращении двигателя за счет запасенной кинетической энергии механизма или под действием активного момента нагрузки, поток остаточного намагничивания ($\Phi_{ост} \neq 0$) будет индуцироваться э.д.с. остаточного намагничивания ($E_{ост} = \kappa \Phi_{ост} \omega_c$), и по цепи якоря будет проходить ток уже обратного направления (сплошные линии). Во избежание размагничивания машины необходимо, чтобы направление тока через ОВ не изменилось (это и позволяет осуществить представленная схема включения). Благодаря

выполнению этого условия, ток создаваемый э.д.с. от остаточного потока, усилит магнитный поток, что в свою очередь, вызовет увеличение Φ и т.д. Таким образом, ДПТ будет работать в режиме самовозбуждения.

Уравнение электрического равновесия в режиме динамического торможения с самовозбуждением будет иметь вид:

$$IR_{\Sigma} = -E, \quad (3.55)$$

где $R_{\Sigma} = R_{\alpha} + R_{\epsilon} + R_{\text{дт}}$, $R_{\text{дт}}$ - добавочное (тормозное) сопротивление, вводимое в контур торможения для ограничения тормозного тока в момент перехода в режим динамического торможения;

$$E = k\Phi(I_{\alpha})\omega_c,$$

где ω_c - скорость вращения двигателя в момент перехода в режим динамического торможения; $k\Phi(I_{\alpha})$ - значение коэффициента э.д.с. в момент перехода.

Из выражения (3.55) несложно определить величину $R_{\text{дт}}$, которое обеспечивает заданный максимальный тормозной ток.

Например, исходя из того, что торможение будет тем интенсивнее, чем больше тормозной ток в цепи якоря, но с другой стороны, по условиям и перегрузочной способности этот ток не должен превышать для ДПТ $(2..2,5)I_n$, задаются $I_{\text{макс(дт)}} = 2I_n$, определяют $k\Phi(I_{\text{макс(дт)}})$ по кривой намагничивания, и зная скорость ω_c , при которой производится перевод двигателя в режим динамического торможения, находят добавочное сопротивление для контура динамического торможения:

$$R_{\text{доб(дт)}} = \frac{k\Phi(I_{T, \text{MAX}}) \cdot \omega}{I_{T, \text{MAX}}} - (R_{\alpha} + R_{\text{ОВ}}). \quad (3.56)$$

Вид характеристик ДПТ ПВ в режиме динамического торможения с самовозбуждением приведен на рис. 3.43.

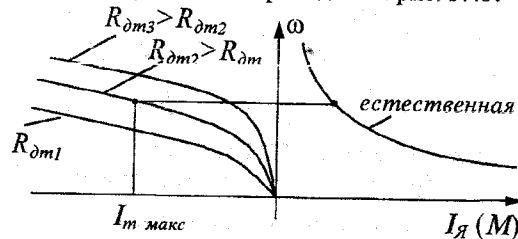


Рис. 3.43. Характеристики ДПТ ПВ в режиме динамического торможения с самовозбуждением

Необходимо отметить, что для обеспечения самовозбуждения ДПТ ПВ недостаточно выполнения условия неизменности направления I_{α} через ОВ как в двигательном, так и в тормозном режимах. Чтобы установить весь перечень условий, обеспечивающих возможность самовозбуждения, рассмотрим физическую сущность этого процесса.

Если ДПТ ПВ работал в двигательном режиме с некоторой скоростью ω_c и ток в якорной цепи при этом был I_c , то э.д.с. машины равна

$$E = k\Phi(I_c) \omega_c.$$

При отключении двигателя от сети и замыкании на $R_{\text{дт}}$ в соответствии с приведенной выше схемой включения знак э.д.с. не изменяется, а ее начальное значение определяется остаточным потоком и скоростью ω_c :

$$E_{\text{ост}} = k\Phi(I_{\text{ост}})\omega_c, \quad (3.57)$$

где $I_{\text{ост}}$ - ток, создаваемый остаточной э.д.с. (это очень малая величина).

Остаточный ток, проходя по обмотке, вызывает возникновение потока Φ_1 , величина которого зависит от $I_{\text{ост}}$, который, в свою очередь, равен

$$I_{\text{ост}} = \frac{E_{\text{ост}}}{R_{\alpha} + R_{\epsilon} + R_{\text{доб}}}. \quad (3.58)$$

Если при этом наводимый поток Φ_1 окажется больше $\Phi_{\text{ост}}$, то произойдет усиление магнитного потока. Э.д.с. двигателя с усилением потока возрастает, а значит и ток $I_{\alpha} = I_{\epsilon}$ станет больше, т.к. $I = \frac{E}{R_{\Sigma}}$, а это

приведет к еще большему увеличению E , I , Φ и т.д. При этом, пока Φ_1 остается небольшим по величине, то и ток I_{α} возрастает медленно (часть характеристики динамического торможения с большой крутизной); при достаточном увеличении потока машины ее ток начинает возрастать быстрее. Это соответствует пологой части характеристики.

Таким образом, процессу самовозбуждения соответствует пологий участок характеристики динамического торможения. Если же, при переводе в режим ДТ сопротивление $R_{\text{дт}}$ будет слишком большим и $I_{\text{ост}}$ из-за этого будет наводить $\Phi_1 < \Phi_{\text{ост}}$, то самовозбуждения не произойдет.

Необходимые условия самовозбуждения могут быть сформулированы следующим образом:

- обеспечить прохождение тока в ОВ в том же направлении, что и в двигательном режиме (реализуется при помощи специальной схемы переключения);

Очевидно, что в соответствии со вторым условием, ДТ с самовозбуждением возможно, причем для больших $R_{\text{дт}}$, тем большей должна быть скорость, на которой производят переход в режим ДТ.

Торможение будет тем интенсивнее, чем меньше $R_{\text{дт}}$, т.е. переход в режим ДТ на заданной скорости при меньших $R_{\text{дт}}$ обеспечивает больший по величине $I_{\text{дт}}$, но при этом следует учитывать, что заданные $R_{\text{дт}}$ и $\omega_{\text{нач}}$ должны обеспечить выполнение условия второго условия самовозбуждения.

Недостатком этого способа торможения является то, что процесс торможения получается недостаточно плавным. Действительно, при опускании груза в первый момент перехода в режим ДТ скорость двигателя и его тормозной момент весьма малы (часть характеристики с большой крутизной). Груз практически свободно опускается под действием силы тяжести; по мере опускания скорость быстро увеличивается, происходит процесс самовозбуждения и тормозной момент резко возрастает. Груз начинает подтормаживаться (рис. 3.44, участок 0-3).

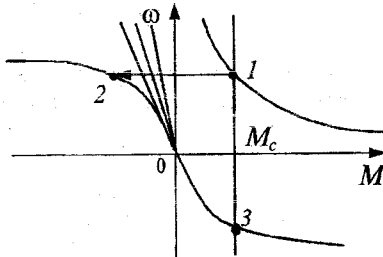


Рис. 3.44. Характеристика динамического торможения при спуске груза

Поэтому режим ДТ с самовозбуждением используется преимущественно в качестве аварийного. Потери в этом режиме пропорциональны квадрату тока нагрузки.

3.7.2.2. Динамическое торможение с независимым возбуждением

Позволяет получить более плавный процесс торможения. В этом случае обмотка возбуждения подключается через добавочное сопротивление к отдельному источнику питания, а якорь двигателя замыкается на тормозное сопротивление (рис. 3.45).

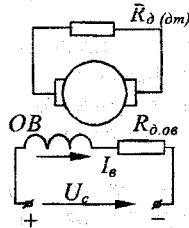


Рис. 3.45. Схема включения ДПТ ПВ в режиме динамического торможения с независимым возбуждением

Добавочное сопротивление в цепи возбуждения $R_{д.об.}$ может быть определено как

$$R_{д.об.} = \frac{U_c}{I_{нов}} R_{я.} \quad (3.59)$$

Поскольку двигатель работает с независимым возбуждением, то характеристики в режиме ДТ в этом случае подобны соответствующим характеристикам ДПТ НВ и являются линейными (рис. 3.46).

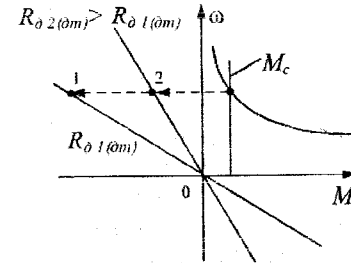


Рис. 3.46. Характеристики ДПТ ПВ в режиме динамического торможения с независимым возбуждением

С ростом $R_{д(якорь)}$ в якорной цепи уменьшается величина тормозного момента, а, следовательно, и интенсивность торможения. Для получения достаточного тормозного момента двигатель должен иметь магнитный поток, приблизительно равный $\Phi_{ном.}$, т.е. в ОВ при этом будет протекать приблизительно номинальный ток возбуждения. Следовательно, при ДТ с независимым возбуждением из сети будет потребляться мощность почти равная номинальной, что значительно снижает энергетические показатели привода

$$\Delta P_{эл} = I_n^2 (R_{я.} + R_{д.об.}) \quad (3.60)$$

И в том, и в другом случае в режим динамического торможения для энергетики привода характерен большими потерями.

3.8. Характеристики и режимы работы двигателей постоянного тока со смешанным возбуждением

Принципиальная схема включения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения (ДПТ СВ) имеет вид, приведенный на рис. 3.47.

Как видно из схемы, магнитный поток двигателя в данном случае определяется алгебраической суммой потоков серийной и шунтовой обмоток:

$$\Phi = \Phi_{ш} \pm \Phi_{с.} \quad (3.61)$$

где знак «+» соответствует согласному включению серийной обмотки возбуждения (ОВ_{с.}) и шунтовой обмотки возбуждения (ОВ_{ш.}), характерному для двигательного режима работы; знак «-» соответствует встречному включению ОВ_{ш.} и ОВ_{с.}. Кроме того, магнитный поток ОВ_{с.} зависит от тока якоря (кривая намагничивания), а магнитный поток шунтовой обмотки является величиной постоянной, не зависящей от I_a .

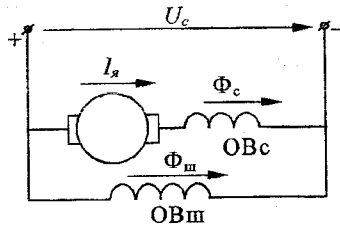


Рис. 3.47. Схема включения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

Таким образом, полный результирующий поток ДПТ СВ можно представить графически в виде суммы двух потоков как показано на рис.3.48.

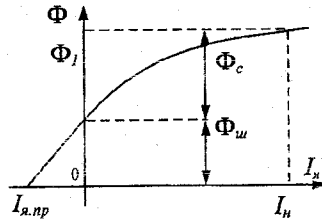


Рис. 3.48. График результирующего потока ДПТ СВ

Из графика для результирующего потока видно, что при переходе двигателя в генераторный режим, т.е. когда I_a изменяет свой знак, знак магнитного потока серийной обмотки Φ_c также изменяется и при некотором значении $I_a = I_{a,пр}$ результирующий поток становится равным нулю, а машина оказывается полностью размагниченной. Величина $\Phi_{рез}$ зависит от того, согласно или встречно включены обмотки возбуждения.

Несложно показать, что при встречном включении обмоток ОВс и ОВш кривая результирующего потока будет иметь вид, представленный на рис. 3.49.

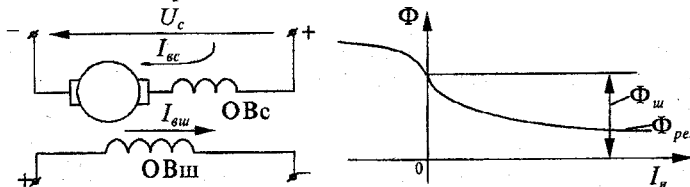


Рис. 3.49. Схема включения (а) и кривая результирующего магнитного потока ДПТ СВ при встречном включении обмоток возбуждения

Следует учитывать также и то, что магнитный поток двигателя зависит от реакции якоря. В связи с этим вид кривой результирующего потока в известной степени будет определяться соотношением

намагничивающих сил обмоток возбуждения, т. е. при различных соотношениях $\frac{\Phi_{ш}}{\Phi_c}$ универсальные характеристики ДПТ ПВ могут оказаться непригодными.

Обычно, в выпускаемых промышленностью двигателях смешанного возбуждения предусмотрено для номинального режима работы соотношение $\frac{\Phi_{ш}}{\Phi_c} \approx 1,6 \div 2,6$ (иногда $\Phi_{ш} \approx \Phi_c$ при номинальном режиме работы), т.е. большая часть магнитного потока обусловлена независимой обмоткой возбуждения.

Наличие двух обмоток возбуждения приводит к тому, что электрохимические и механические характеристики занимают промежуточное положение между характеристиками ДПТ НВ и ДПТ ПВ. В частности, ОВш, создающая постоянный магнитный поток $\Phi_{ш}$, обеспечивает работу двигателя даже при отсутствии тока якоря (т.е. когда $\Phi_c = 0$), другими словами, для ДПТ СВ в естественной схеме включения возможен режим идеального холостого хода. При этом скорость идеального холостого хода определяется величиной потока независимой обмоткой возбуждения:

$$\omega_0 = \frac{U_c}{k\Phi_{ш}} \quad (3.62)$$

Эта скорость выше, чем для ДПТ НВ той же мощности. Скоростные и механические характеристики ДПТ СВ по своей форме приближаются к соответствующим характеристикам двигателей с независимым возбуждением, в зависимости от отношения намагничивающих сил обмоток возбуждения, определяющих величину соответствующих потоков.

3.8.1. Расчет естественной характеристики

Выпускаемые промышленностью ДПТ СВ обычно строятся со значительным насыщением магнитной системы. По этой причине их механические характеристики, как и характеристики ДПТ ПВ, не могут быть достаточно точно и просто выражены аналитически.

Общий вид аналитического выражения для скоростной характеристики:

$$\omega = \frac{U_c - I_a \cdot R_\Sigma}{k \cdot [\Phi_{ш} + \Phi_c(I_a)]} \quad (3.63)$$

где $\Phi_c(I_a)$ - зависимость потока серийной обмотки от тока нагрузки (тока якоря);

$$R_\Sigma = R_{ОВс} + R_a + R_{доб}, \quad (3.64)$$

где $R_{ОВс}$ - сопротивление серийной ОВ.

Соответственно, механическая характеристика:

$$\omega = \frac{U_c}{k[\Phi_m + \Phi_c(I_a)]} \frac{MR_\Sigma}{\{k[\Phi_m + \Phi_c(I_a)]\}^2}. \quad (3.65)$$

Реальные характеристики ДПТ СВ можно рассчитать и построить с помощью приводимых в каталогах универсальных кривых $\hat{\omega} = f_1(\hat{I}_a)$ и $\hat{M} = f_2(\hat{I}_a)$, которые отражают механические и скоростные характеристики ДПТ СВ единой серии и приводятся в относительных единицах (рис. 3.50).

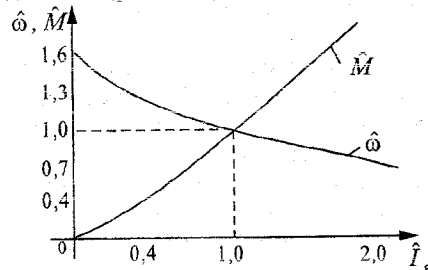


Рис. 3.50. Универсальные характеристики ДПТ СВ

По универсальным кривым можно рассчитать естественные электро-механические и механические характеристики ДПТ СВ, при этом методика расчета идентична методике расчета характеристик ДПТ ПВ.

Вид механических характеристик ДПТ СВ приведен на рис. 3.51.

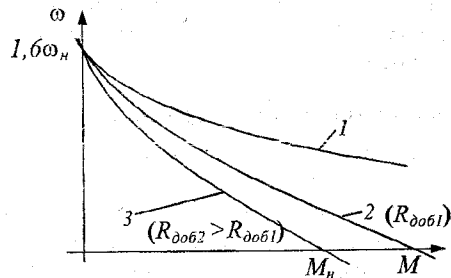


Рис. 3.51. Механические характеристики ДПТ СВ (1-естественная; 2,3-реостатные).

Анализируя механические характеристики ДПТ СВ, отметим следующее:

- все характеристики пересекаются в одной точке, именуемой точкой идеального холостого хода, для которой $I_a = 0$; $\Phi_c(I_a) = 0$; $\Phi_m = \Phi_{m,ном}$;
- при появлении момента на валу скорость вначале снижется

резко, а затем, с увеличением момента изменение скорости происходит довольно медленно. Это объясняется тем, что при малых значениях момента, когда машина не насыщена, а ее поток машины возрастает довольно быстро за счет увеличения $\Phi_c(I_a)$ при увеличении тока якоря. При больших моментах, близких и выше номинального, наступает насыщение магнитной системы и поток $\Phi_c(I_a)$ почти не изменяется. Снижение скорости при этом происходит, в основном, за счет падения напряжения в цепи якоря $I_a \cdot R_\Sigma$. Механическая характеристика тем мягче, чем больше влияние последовательной обмотки, т.е. чем больше доля м.д.с. серийной обмотки в общей м.д.с. двигателя.

- жесткость характеристик снижается с увеличением сопротивления якорной цепи; если для естественной характеристики значения $M_{к.з.}$ (или $I_{к.з.}$) весьма большие, то при наличии $R_{доб}$ в якорной цепи значения $M_{к.з.}$ или $I_{к.з.}$ могут быть уменьшены до допустимых величин, что позволяет при достаточно большой нагрузке (M_c) перевести двигатель в режим противовключения.

- по перегрузочной способности ДПТ СВ занимают промежуточное положение среди ДПТ независимого и последовательного возбуждения. Так, например, при допустимом токе якоря $I_{доп} = (2-2,5)I_n$ наибольшее значение момента $M_{доп}$ будет:

- для ДПТ НВ - $M_{доп} = (2-2,5) M_n$;
- для ДПТ ПВ - $M_{доп} = (2,4 - 3,0) M_n$;
- для ДПТ СВ - $M_{доп} = (2,2 - 2,7) M_n$.

3.8.2. Регулирование скорости двигателей постоянного тока смешанного возбуждения

Регулирование скорости ДПТ СВ осуществляется:

- изменением сопротивления в якорной цепи;
- изменением тока возбуждения независимой обмотки;
- изменением напряжения на якоре;
- шунтированием якоря при наличии последовательного сопротивления $R_{доб}$.

Кроме того, для ДПТ СВ возможно осуществить регулирование скорости путем замыкания накоротко серийной обмотки. Этот прием применяется обычно, как дополнительный, при регулировании изменением сопротивления якорной цепи. В этом случае, если необходимо иметь малые скорости, вводят сопротивления; если необходимо повысить скорость выше основной - замыкают накоротко ОВ, что вызывает уменьшение магнитного потока и двигатель по существу работает с параллельным возбуждением. Т.к. уменьшение магнитного потока происходит не мгновенно (благодаря наличию короткозамкнутого контура), переход на механическую характеристику, соответствующую закороченной ОВ, происходит постепенно.

Искусственные характеристики для этого способа приведены на рис. 3.52, где характеристики 1, 2, 3 соответствуют работе с различными $R_{доб}$; характеристика 4 - работе при $R_{доб}=0$, но при замыкании накоротко ОВ_с.

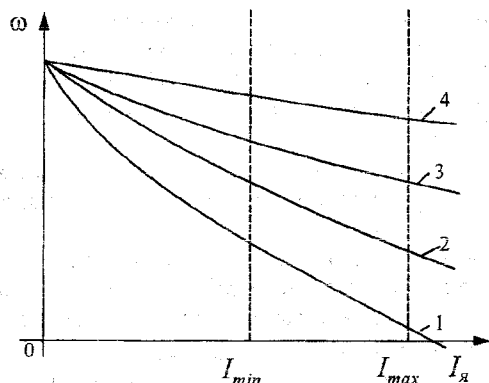


Рис. 3.52. Искусственные характеристики ДПТ СВ

Искусственные характеристики ДПТ СВ рассчитываются по той же методике, что и соответствующие характеристики ДПТ ПВ.

3.8.3. Тормозные режимы работы двигателей постоянного тока смешанного возбуждения

ДПТ СВ может работать в тех же тормозных режимах, что и другие двигатели постоянного тока. Однако, тормозные режимы ДПТ СВ имеют свою специфику, в частности, в режиме рекуперативного торможения.

3.8.3.1. Режим рекуперативного торможения

В режиме рекуперативного торможения, когда $\omega > \omega_0$, т.е. $E_{де} > U_c$ ток якоря изменяет свое направление, что приводит к размагничиванию двигателя, и результирующий поток машин определяется как $\Phi_{ш} - \Phi_c(I_{я})$.

В этом случае скоростные характеристики двигателя (рис. 3.53) будут располагаться во II-м квадранте.

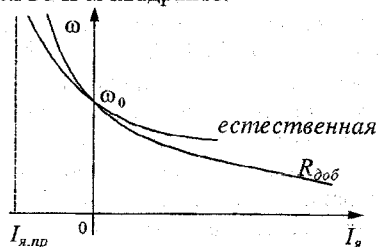


Рис. 3.53. Скоростные характеристики ДПТ СВ в режиме рекуперативного торможения

Скоростные характеристики являются продолжением характеристик двигательного режима во II квадранте, причем крутизна их возрастает. При скорости стремящейся к бесконечности ($\omega \rightarrow \infty$) характеристики асимптотически приближаются к предельному току якоря, току, когда $\Phi_{ш} - \Phi_c(I_{я.пр}) = 0$. Расчет скоростных характеристик в этом режиме можно вести по формуле

$$\omega = \frac{U_c}{-k\Phi_c(I_{я}) + k\Phi_{ш}} - \frac{(-I_{я})R_{\Sigma}}{k\Phi_{ш} - k\Phi_c(I_{я})} \quad (3.66)$$

Механическая характеристика имеет экстремум. Вначале, с ростом скорости, нарастание тормозного тока выше, чем снижение результирующего потока, поэтому тормозной момент увеличивается. При больших токах машина практически полностью размагничивается и тормозной момент уменьшается (рис. 3.54).

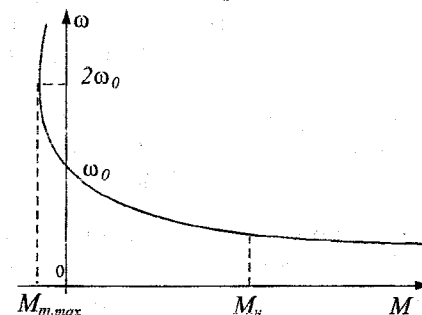


Рис. 3.54. Механическая характеристика ДПТ СВ в режиме рекуперативного торможения

Значение максимального момента в режиме рекуперативного торможения относительно невелико ($M_{т.макс} \approx 0,3-0,7 M_n$) и имеет место при скорости $\omega > 2\omega_0$, причем для точек

$$\omega_0: I_{я} = 0; M_{эм} = 0;$$

$$\omega = \infty: I_{я} = I_{я.пр}; \Phi = 0; M_{э} = 0.$$

Таким образом, механическая характеристика в режиме рекуперативного торможения имеет неустойчивый участок. Модуль жесткости механической характеристики в режиме рекуперативного торможения невелик. Устранить неустойчивую зону работы двигателя в генераторном режиме (а тем самым повысить жесткость характеристик и значение тормозного момента) возможно двумя путями:

- реверсированием (переключением полярности) серийной ОВ при переходе в режим РТ (рис.3.55, характеристика 1). Однако этот способ заметно усложняет схему включения главных цепей двигателя.

- шунтированием сериесной ОВ при переходе в режим РТ. В этом случае двигатель работает в генераторном режиме как ДПТ НВ с неполным потоком возбуждения (рис.3.55, характеристика 2).

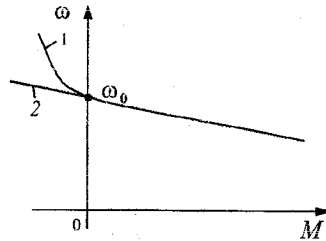


Рис. 3.55. Характеристики ДПТ СВ в режиме рекуперативного торможения при закорачивании сериесной ОВ

Модуль жесткости механических характеристик при втором способе резко возрастет за счет уменьшения R_{Σ} (т.к. $R_{ОВ} = 0$) и постоянства результирующего потока Φ .

При рекуперативном торможении нецелесообразно вводить в цепь $R_{доб}$, т.к. помимо снижения энергетических показателей, скорость при заданной нагрузке становится еще выше ($\omega > \omega_0 = (1,3 - 1,6)\omega_H$).

3.8.3.2. Режим торможения противовключением двигателей постоянного тока смешанного возбуждения

Торможение противовключением для ДПТ СВ осуществляется также, как и для ДПТ ПВ:

- при реактивном характере момента нагрузки изменением полярности напряжения на якоре и введением в якорную цепь добавочного сопротивления $R_{доб}$ с целью ограничения тормозного тока в момент перехода в тормозной режим;

- при активном характере момента нагрузки введением в якорную цепь добавочного сопротивления $R_{доб}$.

На рис.3.56. приведена принципиальная схема ДПТ СВ обеспечивающая описанные способы торможения.

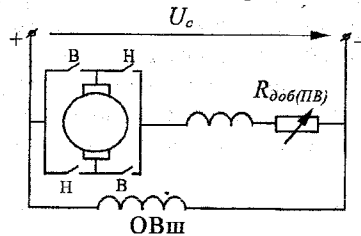


Рис. 3.56. Схема включения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения в режиме противовключения.

Механические характеристики в режиме противовключения при полученных при реверсе напряжения на якоре являются продолжением характеристик двигательного режима из III-го квадранта в IV-й (рис. 3.57, отрезок 1-2).

Характеристика в режиме противовключения, при активном характере момента нагрузки, является продолжением характеристики двигательного режима (рис. 3.57, отрезок 3-4).

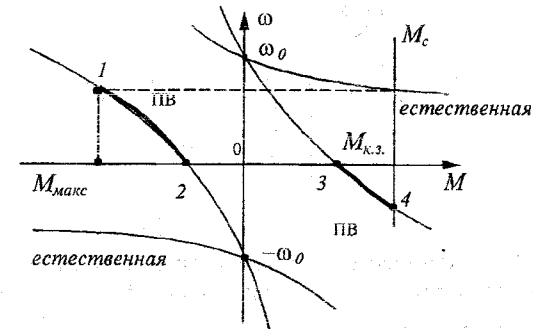


Рис. 3.57. Механические характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения в режиме противовключения

3.8.3.3. Режим динамического торможения

В режиме динамического торможения с сохранением направления вращения возникают те же проблемы, что и в режиме рекуперативного торможения, а именно: за счет изменения направления тока I_a сериесная обмотка будет размагничивать машину и тем самым уменьшать тормозной эффект (рис.3.58, II квадрант). Если же динамическое торможение происходит при изменении направления вращения (рис. 3.58, IV квадрант), то, наоборот, будет иметь место дополнительное намагничивание и увеличение тормозного эффекта.

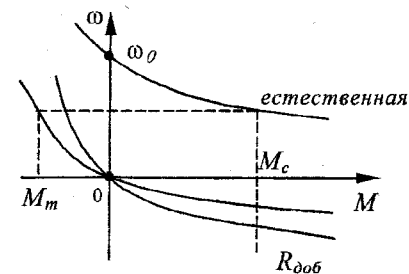


Рис. 3.58. Механические характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения в режиме динамического торможения

Поэтому чаще применяют более простой способ динамического торможения - с независимым возбуждением (сериесная обмотка возбуждения ОВ_с при переводе в режим ДТ закорачивается). Характеристики при этом имеют такую же форму, как и характеристики ДПТ НВ в режиме ДТ (рис. 3.59).

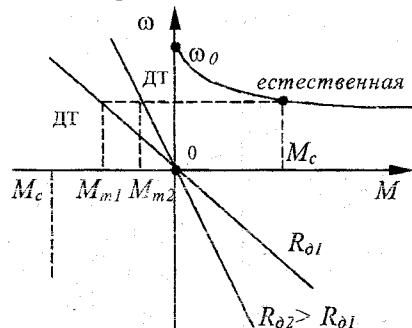


Рис. 3.59. Механические характеристики ДПТ СВ в режиме динамического торможения при закороченной сериесной обмотке

Расчет характеристик рассматриваемых режимов для ДПТ СВ может быть выполнен с помощью любого метода, примененного для ДПТ НВ.

Глава 4

Свойства и характеристики двигателей переменного тока

4.1. Асинхронные двигатели в электроприводе

Асинхронные двигатели (АД) являются в настоящее время самым распространенным типом электродвигателей, применяемым в промышленности и сельском хозяйстве. Это определяется целым рядом преимуществ АД по сравнению с другими видами электродвигателей:

- простотой конструкции и надежностью в эксплуатации;
- меньшей материалоемкостью и трудоемкостью при изготовлении, меньшей стоимостью;
- в 1,5-2,0 раза меньше, чем у ДПТ меньшими массогабаритными показателями на единицу мощности;
- возможностью питания как непосредственно от промышленной сети переменного тока с частотой 50 Гц (в нерегулируемых ЭП), так и от преобразовательных устройств (в регулируемых ЭП);
- обратимостью, т.е. возможностью работы как в двигательном режиме, так и в тормозных режимах: генераторном с рекуперацией энергии в сеть, режиме противовключения или динамического торможения;
- высокими динамическими показателями вследствие меньшего по сравнению с ДПТ момента инерции.

Промышленностью выпускаются АД как с короткозамкнутым ротором, так и с фазным. Первые наиболее просты и надежны, однако регулировочные возможности их ограничены, поэтому в приводах большой мощности большее распространение получили АД с фазным ротором.

В настоящее время диапазон мощностей АД, выпускаемых промышленностью, составляет соответственно:

- для АД с фазным ротором - 1 ÷ (30 ÷ 35) тыс.кВт;
- для АД с короткозамкнутым ротором - 1 ÷ 3,5 тыс.кВт

Следует отметить, что диапазон мощностей у АД с фазным ротором сужается в зависимости от его синхронной скорости вращения - так у двигателей с синхронной скоростью вращения 3000 об/мин мощность не превышает 5000 кВт.

4.2. Характеристики асинхронных двигателей с фазным ротором

4.2.1. Схема замещения асинхронного двигателя

Основным методом анализа свойств и характеристик АД с фазным ротором в статических режимах является использование

эквивалентных схем. Причем, при некоторых допущениях, достаточным является рассмотрение явлений, относящихся к одной фазе многофазного (трехфазного) двигателя. Такими допущениями являются:

- постоянство параметров всех цепей машины и симметрия всех фаз;
- синусоидальность и пофазная симметрия напряжения питания;
- отсутствие насыщения магнитопровода и влияния тока статора на величину реактивных сопротивлений статорной и роторной обмоток;
- постоянство величины полной проводимости намагничивающего контура; пропорциональность тока намагничивания напряжению питания независимо от нагрузки;
- отсутствие добавочных потерь;
- пренебрежение моментами, создаваемые высшими гармоническими.

Эквивалентные схемы, составленные с учетом изложенных допущений, называют *схемами замещения АД*. Различают Т-образную (а) и Г-образную (б) схемы замещения (рис. 4.1).

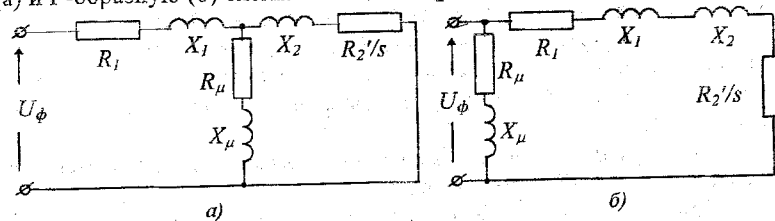


Рис. 4.1. Схема замещения асинхронного двигателя: а) Т-образная схема; б) Г-образная схема.

Выражения для основных рабочих параметров, характеризующих АД, получаемые в результате расчетов на основе Т-образной схемы замещения, достаточно сложны и неудобны для практического использования, хотя результаты расчетов на основе этой схемы более точны. Поэтому эту схему используют лишь в специальных случаях при необходимости учета влияния намагничивающего контура.

На практике, как правило, используют Г-образную схему замещения, пренебрегая при этом изменением тока намагничивания, возникающем при изменении нагрузки, а также падением напряжения от тока намагничивания в сопротивлениях обмотки статора. С учетом того, что индуктивное сопротивление контура намагничивания значительно больше активного сопротивления, последним пренебрегают и схема приобретает более простой вид (рис. 4.2).

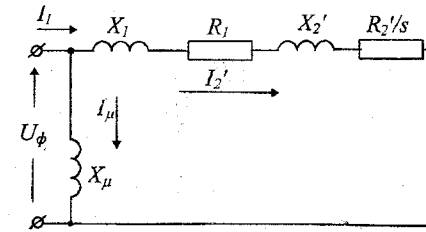


Рис. 4.2. Упрощенная Г-образная схема замещения асинхронного двигателя

Обозначения, принятые в схеме замещения: U_ϕ - действующее значение фазное напряжение на статоре, В; I_1 , I_2 , I_μ - соответственно ток фазы статора, приведенный к статорной обмотке ток ротора, ток намагничивания А; X_μ -

индуктивное сопротивление контура намагничивания, Ом; R_1 , R_2 - активное сопротивление фазы статора и приведенное к статорной обмотке сопротивление фазы ротора, Ом; X_1 , X_2 - индуктивное фазное сопротивление обмотки статора и приведенное к статорной обмотке индуктивное сопротивление ротора, Ом; s - скольжение двигателя, определяемое как

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \quad (4.1)$$

где ω_0 - угловая скорость вращения поля статора АД, называемая синхронной скоростью вращения или скоростью идеального холостого хода.

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_c}{p}, \quad (4.2)$$

f_c - частота напряжения питания сети, Гц; p - число пар полюсов АД.

Примечание: Для машин общепромышленного исполнения характерны определенные соотношения между сопротивлениями схемы замещения. Если принять индуктивное сопротивление контура намагничивания равным 1 Ом, то для сопротивлений двигателя справедливы следующие примерные соотношения:

$$\begin{aligned} X_\mu &= 1 \text{ Ом}; \\ X_1 &= 0,1 \div 0,15 \text{ Ом}; \\ R_1 &= (0,1 \div 0,4) X_1 \text{ Ом}; \\ R_\mu &= (0,5 \div 0,7) R_1 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Представленная схема замещения позволяет рассматривать электромагнитные процессы, протекающие в АД, в наиболее простом и доступном виде благодаря тому, что в ней все параметры обмотки ротора приведены к обмотке статора. Другими словами, реальная обмотка ротора условно заменена некоторой фиктивной, имеющей число фаз, витков, а также обмоточный коэффициент такие же, как и у статорной обмотки.

Сущность приведения вытекает из следующих рассуждений. Асинхронный двигатель в неподвижном состоянии может быть представлен как обычный трехфазный трансформатор (рис. 4.3).

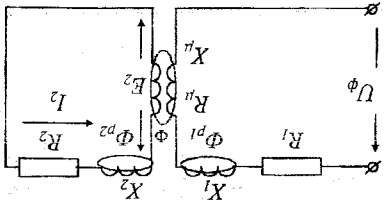


Рис. 4.3. Схема замещения для неподвижного АД с фазным ротором.

При питании обмотки статора трехфазным током создается вращающееся магнитное поле, пересекающее витки обмотки статора и ротора. Соответственно возникают потоки рассеяния статора Φ_{p1} и ротора Φ_{p2} , а также основной поток Φ , замыкающийся через обмотки статора и ротора. При этом в неподвижном роторе будет индуцироваться э.д.с. E_2 . Отношение э.д.с. статора E_1 к э.д.с. ротора E_2 (при неподвижном роторе) называется коэффициентом трансформации по э.д.с.:

$$k_e = \frac{E_2}{E_1} \quad (4.3)$$

где $E_1 \approx 0,95U_1$ - э.д.с. статора, E_2 - э.д.с. ротора.

Коэффициент k_e можно найти, исходя из паспортных данных двигателя:

$$k_e = \frac{0,95U_{н.с.}}{E_{2к}} \quad (4.4)$$

где $U_{н.с.}$ - номинальное линейное напряжение на статоре; $E_{2к}$ - э.д.с. между клеммами неподвижного ротора.

Соответственно отношение между токами ротора и статора называется коэффициентом трансформации по току:

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} \quad (4.5)$$

Коэффициенты k_e и k_i связаны между собой зависимостью

$$k_i = k_e \frac{m_2}{m_1} \quad (4.6)$$

где m_1, m_2 - соответственно число фаз обмоток статора и ротора.

Используя коэффициенты трансформации, приведем обмотку неподвижного ротора к статору (рис. 4.4):

$$E_2 = E_2 \cdot k_e = E_1;$$

$$I_2 = \frac{I_2}{k_e} = I_1;$$

$$R_2 = \frac{E_2}{I_2} = \frac{E_2 k_e}{I_2} \cdot k_e = R_2 \cdot k_e^2; \quad X_2 = X_2 \cdot k_e^2. \quad (4.9)$$

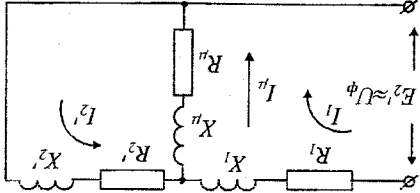


Рис. 4.4. Схема приведение неподвижного ротора к цепи статора АД.

В случае, когда частота вращения ротора отличается от частоты поля статора ($f_2 \neq f_1$), параметры двигателя будут иметь значения соответственно:

$$X_2 = 2\pi f_2 L_2, \text{ т.е. } X_2 = f_2(s);$$

$$E_2 = 4,44 f_2 \Phi k_e, \text{ т.е. } E_2 = f_2(s).$$

и схема замещения принимает вид (рис. 4.5, 6). Эта схема получена путем последовательных преобразований схем приведенных на рис. 4.5, а и рис. 4.5, б.

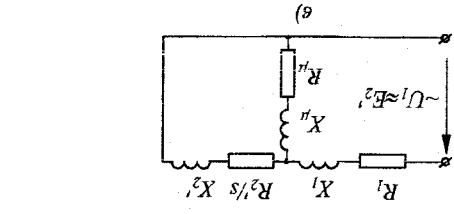
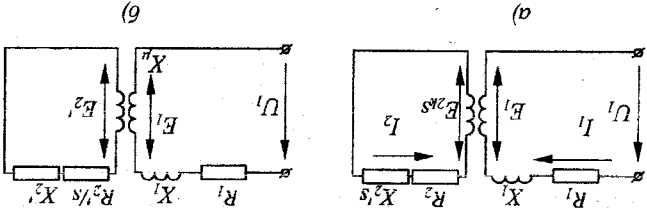


Рис. 4.5. Приведение схемы замещения АД с фазным ротором

Так как падение напряжения в обмотке статора незначительно (в особенности для крупных двигателей, у которых активное сопротивление статора мало), то контур намагничивания можно перенести на обмотку статора, считая, что $U_1 \approx E_2$. В обычной схеме АД подключается непосредственно на сеть переменной частоты (рис. 4.6).

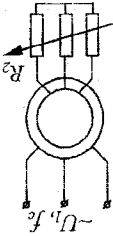


Рис. 4.6. Схема включения асинхронного двигателя на сеть

При этом величина тока намагничивания приближенно определяется в соответствии с выражением:

$$I_{\mu} \approx \frac{U_1}{I_1} = I_0 = \frac{z_{\mu}}{U_1}, \quad z_{\mu} = X_{\mu}, \quad (4.10)$$

где $X_{\mu} = \omega L_{\mu}$, т.е. X_{μ} зависит от степени насыщения стали машины; L_{μ} - индуктивность контура намагничивания.

В свою очередь, L_{μ} зависит от величины тока намагничивания I_{μ} , что показано на графике (рис. 4.7):

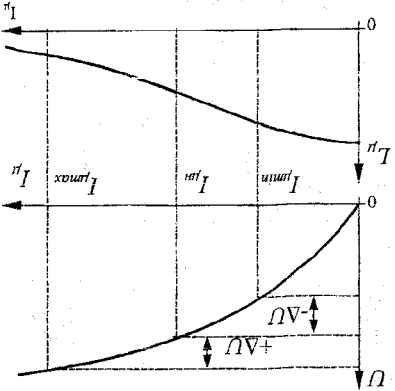


Рис. 4.7. Зависимость индуктивности асинхронного двигателя от тока намагничивания статора

Ток намагничивания I_{μ} зависит от величины приложенного напряжения (с увеличением напряжения I_{μ} также будет увеличиваться). С другой стороны, рост I_{μ} приводит к уменьшению индуктивности, что опять-таки, за счет уменьшения $X_{\mu} = \omega L_{\mu}$ приводит к еще большему увеличению значения тока I_{μ} и машина может оказаться насыщенной (что связано с ростом потерь в стали машины), и статор двигателя будет перегреваться. Поэтому необходимо помнить, что для нормальной работы ΔU в соответствии со стандартом, необходимо чтобы

$$+\Delta U_{\text{нм}} \leq 5\% U_{\text{н}}, \quad -\Delta U_{\text{нм}} \leq 10\% U_{\text{н}}.$$

Значение тока намагничивания зависит и от частоты напряжения питания:

$$I_{\mu} \approx \frac{U_{\text{нм}}}{X_{\mu}} = \frac{2\pi f L_{\mu}}{U_{\text{нм}}}, \quad (4.11)$$

т.е. уменьшение частоты питающего напряжения f приводит к насыщению стали; при этом I_{μ} растёт, L_{μ} уменьшается, X_{μ} уменьшается вызывая еще больший рост I_{μ} . Поэтому при колебаниях частоты должны устанавливаться определенные границы.

Указанных выше недостатков можно избежать в системах регулируемого ЭП, позволяющих регулировать напряжение одновременно с частотой в соответствии с законом частотного регулирования, например, вида

$$\frac{f}{U} = \text{const}, \quad (4.12)$$

что обеспечивает постоянное постоянство магнитного потока $\Delta \Phi$.

4.2.2. Скоростные характеристики асинхронного двигателя с фазным пуском

Для вывода выражений скоростных характеристик асинхронного двигателя воспользуемся схемой замещения, приведенной на рис. 4.2. С учетом векторной диаграммы токов асинхронного двигателя (рис. 4.8)

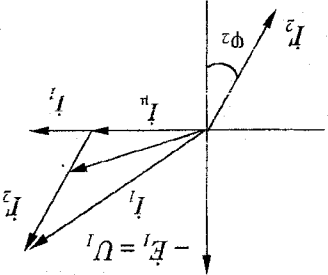


Рис. 4.8. Векторная диаграмма токов асинхронного двигателя

запишем выражение для тока I_2 :

$$I_2 = \frac{U_{\text{нм}}}{U_{\text{нм}}} = \frac{\sqrt{\left(R_1 + \frac{s}{2}\right)^2 + \left(X_1 + X_2\right)^2}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{s}{2}\right)^2 + X_2^2}} U_{\text{нм}}, \quad (4.13)$$

где $X_{\mu} = X_1 + X_2$ - приведенное к цепи статора индуктивное сопротивление короткого замыкания $\Delta \Phi$. Это выражение определяет зависимость скоростной характеристики

$$\sqrt{I_2} = f(s) = \frac{U_{I\phi}}{\sqrt{R_1 + \frac{R_2}{s} + X_2^2}} \quad (4.14)$$

Под скоростью и механической характеристиками АД

подразумевается зависимость тока и момента от скольжения.

Рассмотрим электромеханические (скоростные характеристики) асинхронного двигателя с фазным потопом $I_2 = f_2(s)$ и $I_2 = f_2(s)$, (или скорости). Уравнением скоростной характеристики в функции приведенного тока ротора I_2 является выражение (4.14). Очевидно, что при $s > 0$ по мере увеличения скольжения функция $I_2(s)$ монотонно возрастает (причем, при $s = 0$ ток в I_2 также равен нулю).

При пуске АД, когда $s = 1$, ток в роторе равен пусковому ($I_2 = I_{2\text{п}} = I_{2\text{пуск}}$) и определяется в соответствии с выражением:

$$I_{2\text{п}} = \frac{U_{I\phi}}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + X_2^2}} \quad (4.15)$$

Общий вид скоростной характеристики по контуру ротора в функции скольжения и угловой скорости вращения приведен на рис. 4.9 (а, б).

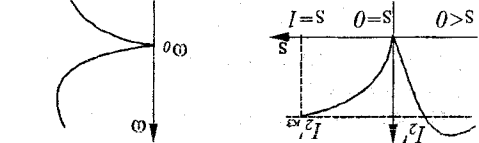


Рис. 4.9. Скоростные характеристики асинхронного двигателя: для тока ротора а) в функции скольжения; б) в функции угловой скорости.

Из анализа зависимости $I_2 = f(\omega)$ (рис. 4.9, б) видно, что практически на всем диапазоне изменения скольжения $0 < s < 1$ ток незначительно меньше, чем ток $I_{2\text{п}}$ (пусковой ток). Ток спадает до номинальной величины только вблизи области номинального скольжения. В интервале скольжений $s < 0$, что соответствует генераторному режиму, ($\omega > \omega_0$) можно видеть, что зависимость $I_2(s)$ вначале интенсивно возрастает до некоторого максимума

$$I_{2\text{max}} = \frac{X_2}{U_{I\phi}} \quad (4.16)$$

при скольжении $s = -\frac{R_2}{R_1}$, а затем медленно стремится к своему предельному значению $I_{2\text{кз}}$, но уже сверху. При отрицательных значениях скольжения по

абсолютной величины ток в генераторном режиме несколько больше тока I_2 в

двигательном режиме.

Для вывода выражения скоростной характеристики для тока статора $I_1(s)$, используем векторную диаграмму токов АД (рис. 4.8), из которой видно, что ток I_1 является суммой тока намагничивания I_μ и тока

ротора I_2 :

$$I_1 = I_\mu + I_2 \quad (4.17)$$

Для схемы замещения с вынесением на зажимы статора контуром намагничивания ток намагничивания I_μ сохраняется неизменным во всех режимах и его модуль может быть определен как

$$I_\mu = \frac{X_\mu}{U_{I\phi}} \approx \frac{X_\mu}{U_{I\phi}} \quad (4.18)$$

(составляющей $R_1 + R_2$ ввиду ее малости по отношению к X_μ можно пренебречь).

Тогда модуль тока I_1 равен

$$\sqrt{I_1^2} = \sqrt{I_\mu^2 + I_2^2} \quad (4.19)$$

где $I_{2\text{п}} = I_2 \cdot \cos \varphi_2$; $I_2 \sin \varphi_2$; φ_2 - угол сдвига между током ротора и I_2 . с. ротора (угол нагрузки), который может быть определен из выражения:

$$\sqrt{I_2 \varphi_2} = \frac{R_2 + \frac{R_1}{s}}{X_2} \quad (4.20)$$

График зависимости $I_1 = f(s)$ приведен на рис. 4.10:

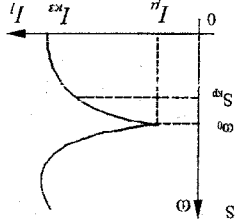


Рис. 4.10. Скоростная характеристика асинхронного двигателя в функции тока статора

Анализ зависимости $I_1 = f(s)$ показывает, что при $s = 0$ (когда $I_2 = 0$), ток в обмотке статора равен току намагничивания (ток холостого хода) $I_1 = I_\mu = I_{\text{хх}}$.

4.2.3. Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным

Уравнение механической характеристики $M_2 = f(s)$ можно получить, рассмотрев баланс мощностей в двигателе. Электромагнитная мощность P_{12} ,

передаваемая от статора потора вращающимся магнитным полем, определяется как

$$P_{12} = M \omega_0. \quad (4.21)$$

Эту мощность можно представить в виде двух составляющих: механической мощности $P_{мех}$ и мощности потерь в поторе $\Delta P_{\sigma 2}$, причем $P_{мех} = M \omega$, а $\Delta P_{\sigma 2}$ - это потери в меди потора и потери на перемагничивание потора (потери в стали потора). Ввиду малости потерь в стали ими можно пренебречь и тогда

$$P_{12} = M \omega_0 = M_0 \omega + \Delta P_{\sigma 2} \Rightarrow \Delta P_{\sigma 2} = M(\omega_0 - \omega) = M_0 \omega_s. \quad (4.22)$$

С другой стороны,

$$\Delta P_{\sigma 2} = m(I_2^2)^2 R_2, \quad \text{где } m - \text{число фаз обмотки двигателя.}$$

$$M = \frac{m(I_2^2)^2 R_2}{\omega_s}. \quad (4.24)$$

Подставив в это выражение вместо I_2 его значение из скоростной характеристики, получим выражение для механической характеристики асинхронного двигателя с фазным потором $M = f(s)$:

$$M_{ам} = \frac{m U_{1\phi}^2 R_2}{\omega_s \left[R_1 + \frac{s}{2} \left(R_2^2 + X_2^2 \right) \right]}. \quad (4.25)$$

Зависимость $M = f(s)$ имеет максимум, так как при $s=0$ и $s \rightarrow \pm \infty$ электромеханический момент становится равным нулю. Это видно из выражения:

$$M_s = \frac{m U_{1\phi}^2 R_2}{m U_{1\phi}^2 R_2 \cdot s} = \frac{\omega_s \left[R_1 + \frac{s}{2} \left(R_2^2 + X_2^2 \right) \right]}{\omega_s R_2} = 0, \quad \text{при } s=0$$

- при $s \rightarrow \infty$ электромеханический момент равен нулю, что очевидно из выражения (4.25).

Максимальное значение электромеханического момента называют критическим моментом $M_{кр}$ и соответствующее ему скольжение - критическим скольжением $s_{кр}$. Определить значение $s_{кр}$ можно приравняв нулю уравнение для первой производной момента по скольжению.

$$\frac{dM}{ds} = 0$$

Решение этого уравнения позволяет получить выражение для критического скольжения:

$$s_{кр} = \pm \frac{\sqrt{R_1^2 + X_2^2}}{R_2}. \quad (4.27)$$

Подставив выражение для $s_{кр}$ в формулу (4.25) и выполнив соответствующие преобразования, получим выражение для критического момента $M_{кр}$:

$$M_{кр} = \frac{3 U_{1\phi}^2}{2 \omega_0 \left(R_1 \pm \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \right)}. \quad (4.28)$$

Знаки « $\pm$ » означают, что максимум момента может иметь место при $s > 0$ (в двигательном режиме или режиме противовключения), или при $s < 0$ (в режиме рекуперативного торможения), причем знак « $+$ » соответствует двигательному режиму или режиму противовключения, а знак « $-$ » - режиму рекуперативного торможения. Очевидно, что при работе в генераторном режиме $M_{кр}(\pi) > M_{кр}(0 \text{ или } 2\pi)$.

График механической характеристики $M_s - f(s)$ приведен на рис. 4.11.

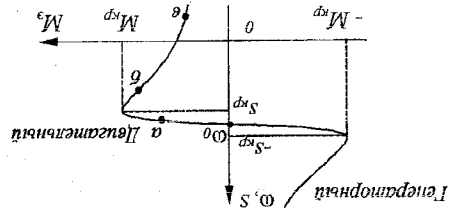


Рис. 4.11. Механическая характеристика асинхронного двигателя $M_s = f(s)$

Пусковой момент, при $s=1$ (т.е. когда $\omega=0$, что соответствует пуску двигателя) будет равен:

$$M_{пуск} = \frac{3 U_{1\phi}^2 R_2}{\omega_0 \left[R_1 + R_2 + X_2^2 \right]}. \quad (4.29)$$

Для приближенного расчета механической характеристики АД используют зависимость, получившую название формулы Клосса:

$$M_s = \frac{2 M_{кр} (1 + a s_{кр})}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + 2 a s_{кр}}, \quad \text{где } a = \frac{R_2}{R_1}. \quad (4.30)$$

Так как в машинах большой мощности сопротивление R_1 невелико, то $R_1 \ll X_k$ и, следовательно,

$$as_{kp} = \frac{R_1}{R_2} s_{kp} = \frac{R_1}{R_2} \sqrt{\frac{R_2^2 + X_k^2}{R_1^2 + X_k^2}} \ll 1,$$

формулу Клосса для критических $A \parallel$ с фазным ротором с можно записать в виде:

$$M_g = \frac{2M_{kp}}{s + \frac{s_{kp}}{s}}, \quad (4.31)$$

где

$$s_{kp} \approx \pm \frac{R_2}{R_1} \frac{X_k}{R_2}, \quad (4.32)$$

Критический момент приближенно определяется выражением:

$$M_{kp} = \frac{mU^2}{I\phi} \frac{2\omega_0 x_k}{s}, \quad (4.33)$$

(4.25) состоит в том, что расчет механической характеристики по ней возможен на основании паспортных данных двигателя.

Например, для критичных машин

$$s_{kp} = s_n \left(\lambda_n + \sqrt{\lambda_n^2 - 1} \right), \quad (4.34)$$

где λ_n - перепрыгивающая способность по моменту.

$$M_{kp} = \lambda_n \cdot M_n. \quad (4.35)$$

При использовании упрощенной формулы Клосса достаточно большая погрешность в расчетах возникает при малых скоростях двигателя (ниже точки, соответствующей M_{kp}), т.к. в этом случае ток статора велик и падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора R_1 значительно выше, чем при больших скоростях.

Выполним анализ формы механической характеристики и укажем ее характерные точки, воспользовавшись формулой Клосса:

- при малых значениях скольжения $s < (0,4 \div 0,35)s_{kp}$, отношение s/s_{kp} можно пренебречь. В этом случае механическая характеристика может быть представлена зависимостью

$$M_g = \frac{2M_{kp}}{s_{kp}} s, \quad (4.36)$$

т.е. представляет собой прямую линию (рис.4.11 участок ω_0 -а). Точка, соответствующая номинальному режиму работы находится на этом участке

($s_n \ll s_{kp}$). Этот участок называют рабочим участком механической характеристики.

- при $s > s_{kp}$ можно пренебречь вторым слагаемым в знаменателе формулы Клосса (s_{kp}/s). На этом участке электромеханический момент M_g изменяется по гиперболическому закону. Этот участок называют неустойчивым (нерабочим) участком механической характеристики.

- на участке, где $s \approx s_{kp}$, происходит скругление характеристики. В этой области характеристика явно нелинейная, а работа двигателя крайне неустойчива.

Характерными точками зависимости $M(\omega)$ являются:

- $s=0$, $\omega=\omega_0$, $M=0$ - точка идеального холостого хода (значение синхронной скорости ω_0 зависит только от частоты питающего напряжения и числа пар полюсов машины (4.2)).

- $s=s_{kp}$, $M=M_{kp}$ - точка критического скольжения. Как следует из (4.27)

критическое скольжение уменьшается при возрастании индуктивного сопротивления обмоток и, наоборот, увеличивается с ростом активного сопротивления цепи ротора. Это означает, что чем больше R_1 и X_k , тем меньше рабочий участок механической характеристики. В то же время величина s_{kp} не зависит от питающего напряжения, тогда как M_{kp} пропорционален квадрату напряжения $M \sim U^2$. Такая зависимость M_{kp} от U объясняется тем, что расчет механической характеристики по ней возможен на основании паспортных данных двигателя.

Основное преимущество формулы Клосса, по сравнению с формулой (4.25) состоит в том, что расчет механической характеристики по ней возможен на основании паспортных данных двигателя.

Например, для критичных машин

$$s_{kp} = s_n \left(\lambda_n + \sqrt{\lambda_n^2 - 1} \right), \quad (4.34)$$

где λ_n - перепрыгивающая способность по моменту.

$$M_{kp} = \lambda_n \cdot M_n. \quad (4.35)$$

При использовании упрощенной формулы Клосса достаточно большая погрешность в расчетах возникает при малых скоростях двигателя (ниже точки, соответствующей M_{kp}), т.к. в этом случае ток статора велик и падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора R_1 значительно выше, чем при больших скоростях.

Выполним анализ формы механической характеристики и укажем ее характерные точки, воспользовавшись формулой Клосса:

- при малых значениях скольжения $s < (0,4 \div 0,35)s_{kp}$, отношение s/s_{kp} можно пренебречь. В этом случае механическая характеристика может быть представлена зависимостью

$$M_g = \frac{2M_{kp}}{s_{kp}} s, \quad (4.36)$$

т.е. представляет собой прямую линию (рис.4.11 участок ω_0 -а). Точка, соответствующая номинальному режиму работы находится на этом участке

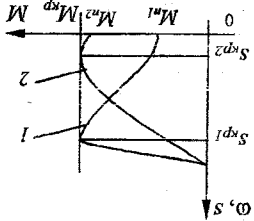


Рис. 4.12. Реостатная механическая характеристика асинхронного двигателя: 1 - естественная; 2 - с добавочным сопротивлением

Критический момент асинхронного двигателя зависит от конструктивных особенностей двигателя. Например, для двигателей серии

этом $M_{\text{тх}} = (0.8 \div 1.6) M_{\text{к}}$, что обусловлено тем, что электромагнитный момент в асинхронном двигателе создается не полным током ротора, а только его активной составляющей I_a' , а в момент пуска величина этой составляющей мала в силу того, что индуктивное сопротивление X_r при пуске значительно больше активного, так как частота э.д.с. ротора равна частоте сети. Следовательно, активная составляющая тока I_a' при пуске намного меньше реактивной составляющей I_r' и электромагнитный момент, пропорциональный активной составляющей тока, также мал.

4.3. Тормозные режимы асинхронного двигателя с фазным помощом

Асинхронный двигатель может работать во всех тормозных режимах: рекуперативного торможения, торможения противовключением или с самовозбуждением.

4.3.1. Режим рекуперативного торможения

Асинхронный двигатель, как и все электрические машины, обладает свойством обратимости. Если, например, к валу двигателя приложен тормозной момент, то АД работает в двигательном режиме и потребляет мощность из сети. При отсутствии статического момента на валу двигателя, подключенный к сети, будет вращаться со скоростью, близкой к синхронной, потребляя при этом из сети энергию, необходимую для покрытия потерь. Режим рекуперативного торможения возникает, когда скорость вращения ротора ω становится больше, чем скорость вращения магнитного поля статора ω_0 , если $\omega > \omega_0$. Это возможно при активном характере момента на валу, действие которого направлено в сторону вращения двигателя, или при переходе с большей скорости на меньшую (например, при переключении двигателя на большее число полюсов или при уменьшении частоты питающего напряжения). В каждом из этих случаев двигатель выступает как генератор и отдает активную энергию в сеть. Этот вывод распространяем на приемере выражения для приведенного тока ротора, представленного в комплексной форме. Для простоты выкаждок активным сопротивлением фазы статора R_1 пренебрегаем. Выражение для приведенного тока ротора

$$I_2' = \frac{E_2' s}{R_2' + jX_2' s} \quad (4.37)$$

Преобразовав его, получим:

$$I_2' = \frac{E_2' R_2' s}{(R_2' + jX_2' s)(R_2' - jX_2' s)} = \frac{E_2' R_2' s}{R_2'^2 + X_2'^2 s^2} - j \frac{E_2' X_2' s^2}{R_2'^2 + X_2'^2 s^2} \quad (4.38)$$

т.е. $\frac{E_2' R_2' s}{R_2'^2 + X_2'^2 s^2}$ - активная составляющая тока; $\frac{E_2' X_2' s^2}{R_2'^2 + X_2'^2 s^2}$ - реактивная составляющая тока.

Из выражения (4.38) видно, что при переходе в генераторный режим, когда скольжение двигателя становится меньше нуля, изменяет свой знак только активная составляющая тока, участвующая в создании электромагнитного момента, и, следовательно, знак момента становится отрицательным, что соответствует тормозному режиму:

$$P_a = M_{\text{г}} \cdot \omega < 0, \text{ т.к. } M_{\text{г}} < 0, \text{ а } \omega > 0.$$

Реактивная составляющая тока сохраняет свой знак независимо от знака скольжения. Это обстоятельство указывает на то, что АД как в двигательном, так и в генераторном режиме потребляет реактивную энергию из сети, а это означает, что генераторный режим АД возможен только при наличии источника реактивной мощности, необходимой для создания магнитного поля двигателя.

Механические характеристики АД в режиме рекуперативного торможения являются продолжением характеристик двигательного режима и располагаются во втором квадранте при положительном направлении вращения, или в четвертом - при отрицательном. Выражения для расчета характеристик тождественны выражениям для расчета характеристик в двигательном режиме:

$$M_{\text{д}} = \frac{m U_2^2 R_2' \left[(R_1' + \frac{s}{R_2'})^2 + X_2'^2 \right]}{s} \quad (4.39)$$

или

$$M_{\text{д}} = \frac{2 M_{\text{кп}} (1 + a s k_p)}{\frac{s}{s k_p} + \frac{s}{s k_p} + 2 a s k_p} \quad (4.40)$$

при условии, что $s < 0$.

Критическое скольжение в режиме рекуперативного торможения:

$$s_{\text{кп}} = - \frac{R_2'}{\sqrt{R_1'^2 + X_2'^2}} \quad (4.41)$$

а критический момент

$$M_{kp} = \frac{mU_{1\phi}^2}{2\omega_0 \left[R_1 - \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right]} \quad (4.42)$$

большее критического момента в двигательном режиме. Рассмотрим периоды работы АД в режиме рекуперативного торможения.

Режим рекуперативного торможения при спуске груза

Пусть к валу двигателя приложен активный момент нагрузки, действующий в направлении вращения (рис. 4.13):

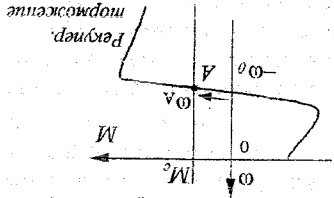


Рис. 4.13. Режим рекуперативного торможения АД при спуске груза

При активном моменте на валу M_c ротор двигателя, включенный "на спуск", разгоняется до скорости $\omega_A > \omega_0$. При этом двигатель переходит в генераторный режим, развивая тормозной момент. Спуск груза будет происходить с подтормаживанием, так как

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon = \frac{f}{M - M_c} < 0.$$

Установившаяся работа в режиме рекуперативного торможения соответствует точка А (при этом груз будет опускаться со скоростью ω_A). Этот режим находит широкое применение в подъемно-транспортных установках.

Следует иметь в виду, что для обеспечения нормального (устойчивого) режима спуска груза необходимо, чтобы статический момент не превосходил критического момента M_{kp} АД в генераторном режиме. В режиме рекуперативного торможения любая внешняя сопротивляемость в цепи ротора обычно не вводит, так как вращение ротора двигателя происходит при скоростях, больших синхронной.

Рекуперативное торможение с реактивным моментом на валу

Пусть на валу двигателя реактивный статический момент. Режим рекуперативного торможения возможен только в системах регулируемого ЭП, например, путем переключения числа пар полюсов (рис. 4.14).

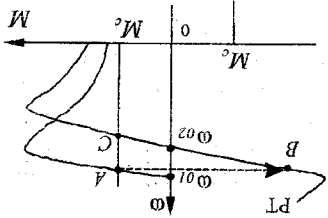


Рис. 4.14. Рекуперативное торможение АД с фазным ротором при

реактивном характере момента на валу.

Как видно из графика, при работе АД с реактивным моментом M_c переключение двигателя на большее число пар полюсов приводит к уменьшению синхронной скорости ($\omega_{02} < \omega_{01}$), это означает, что скорость вращения ротора в момент переключения окажется выше синхронной ($\omega_A > \omega_{02}$), а электромагнитный момент становится тормозным, в результате двигатель переходит в режим рекуперативного торможения. Указанный процесс имеет место, например, в приводах металлорежущих станков. В отношении энергетических показателей режим рекуперативного торможения является наиболее эффективным, так как сопровождается отдачей активной энергии в сеть.

4.3.2. Торможение асинхронного двигателя с фазным ротором в режиме противоключения

Режим торможения противоключением может быть получен следующим образом:

- изменением направления вращения поля статора (при активном и реактивном характере момента на валу);
- введением любого внешнего сопротивления в цепь ротора (при активном характере момента на валу).

Режим торможения противоключением за счет изменения направления вращения поля статора реализуется изменением порядка чередования фаз питающего напряжения, как показано на рис. 4.15.

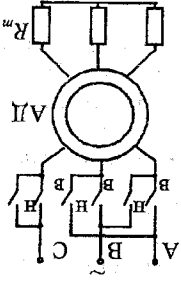


Рис. 4.15. Принципиальная схема включения АД в режим торможения противоключением изменением чередования фаз обмотки статора

Эта схема используется в электроприводах, работающих как с активным, так и реактивным моментом на валу. Дополнительно в цепь ротора вводят добавочное сопротивление R_m с целью ограничения тормозного тока и получения необходимого тормозного момента (рис. 4.16). Если двигатель работает в двигательном режиме в точке А, в зависимости от величины тормозного сопротивления в цепи ротора, в режиме противовключения начальный тормозной момент будет M_{m1} , M_{m2} или M_{m3} . Под действием тормозного момента вращения ротора двигателя замедляется. При полной остановке двигателя необходимо отключить от сети, в противном случае произойдет изменение направления вращения ротора, и АД будет работать уже в двигательном режиме (при условии, если пусковой момент больше момента нагрузки).

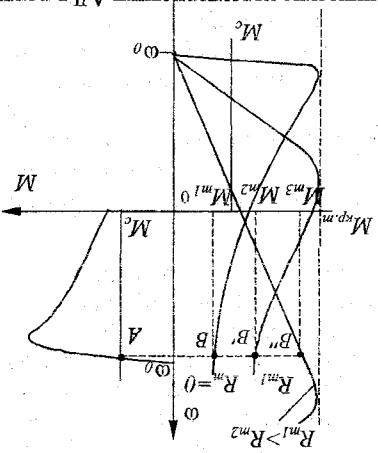


Рис. 4.16. Механические характеристики АД в режиме торможения

С точки зрения энергетических характеристик торможения противовключением не равноценны. При переходе на тормозную характеристику с $s > s_{kp}$ (т. В'' на рис. 4.16.) тормозной момент выше, чем при переходе на характеристику с $s < s_{kp}$ (т. В и В' на рис. 4.16.), а тормозной ток и электрические потери ниже. Режим торможения противовключением при активном характере момента на валу осуществляется так же как и при реактивном характере момента. Однако, если в момент останова ротора двигателя не отключить от сети, то АД по действием активного момента перейдет в двигательный режим, а затем - в режим рекуперативного торможения (рис. 4.САРи", точки С, С', С'').

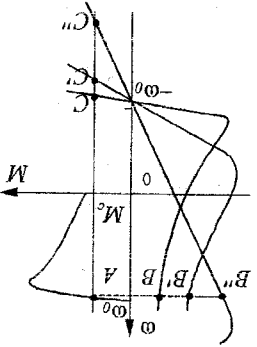


Рис. 4. Механические характеристики в режиме торможения противовключением при активном характере момента на валу

Расчет механических характеристик производится по выражениям, справедливым для двигательного режима, но при условии, что $s > 1$. При этом начальное скольжение режима торможения определяется следующим образом:

$$s^{(nc)} = \frac{\omega_0}{\omega_0 + \omega_B} \quad (4.43)$$

где $\omega_B = \omega_A$ - скорость в момент перехода в режим торможения.

Выразив скорость в точке А через скольжение, получим

$$\omega_A = \frac{\omega_0 (1 - s_A)}{\omega_0}, \quad (4.44)$$

где s_A - скольжение в двигательном режиме работы до перехода в режим торможения противовключением, получим выражение для начального скольжения в режиме торможения противовключением:

$$s^{nc(nc)} = \frac{\omega_0}{\omega_0 + \omega_A} = \frac{\omega_0}{\omega_0 + \omega_0 (1 - s_A)} = \frac{1}{2 - s_A}. \quad (4.45)$$

Режим торможения противовключением при активном характере момента на валу может быть получен, когда момент нагрузки ротора достигает введения в цепь ротора добавочного сопротивления. При этом величина добавочного сопротивления выбирается такой, чтобы пусковой момент на искровосстановительной характеристике был меньше момента противовключения (рис. 4.18). При этом, как показано на рис. 4.18., из т. А (точки противовключения) при введении добавочного сопротивления на искровосстановительную характеристику в т. В, затем происходит переход на искровосстановительную характеристику в т. В', затем замедление до полной остановки (т. С) и переход в режим торможения противовключением под действием активного момента (т. D).

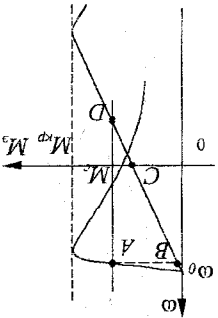


Рис. 4.18. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме противовключения при активной нагрузке на валу

Расчет характеристик в режиме торможения противовключением выполняется по приведенным выше выражениям. Рассмотренный способ торможения противовключением находит применение в подъемно-транспортных установках при необходимости опускания грузов на малых скоростях.

4.3.3. Режим динамического торможения АД с фазным ротором

Для осуществления режима динамического торможения асинхронный двигатель отключают от сети переменного тока. При этом за счет момента, создаваемого рабочей машиной, АД работает как генератор. При отключении от остаточного намагничивания стали статора. При этом э.д.с., индуцируемая этим потоком во вращающемся роторе, и ток в его обмотках незначительны. Взаимодействие тока с остаточным потоком статора не позволяет создать достаточный по величине тормозной момент. Если же АД перед включением оказался размагнитченным, то включение его в режиме динамического торможения вообще не даст никакого эффекта, так как тормозной момент будет равен нулю.

Таким образом, для получения тормозного момента при работе двигателя в режиме динамического торможения необходимо обеспечить наличие магнитного потока в статоре. В зависимости от способа возбуждения асинхронной машины различают два режима динамического торможения:

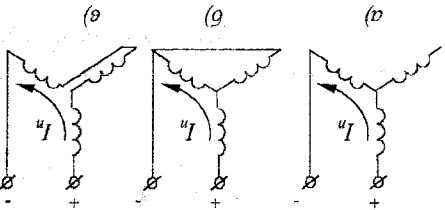
- динамическое торможение с независимым возбуждением статора постоянным током (от источника постоянного тока);
- динамическое торможение с самовозбуждением, в качестве источника реактивной мощности для возбуждения АД используются конденсаторные батареи.

Рассмотрим более распространенный способ - динамическое торможение с независимым возбуждением.

Ввиду того, что при питании постоянным током обмотка статора будет обладать лишь активным сопротивлением, напряжение источника постоянного тока должно быть гораздо меньше номинального напряжения питания асинхронного двигателя, чтобы не вызвать перегрева обмотки статора. Поэтому техническая реализация этого способа торможения связана с применением понижающих трансформаторов для АД небольшой частоты.

Согласно закону Ленца, направление тока должно быть таким, чтобы его взаимодействие с магнитным полем препятствовало причине, порождающей э.д.с., в данном случае - вращению ротора. При этом АД будет представлять собой неявнополосный синхронный генератор, работающий с переменной частотой.

Рис. 4.20. Схемы соединения обмоток статора в режиме динамического торможения

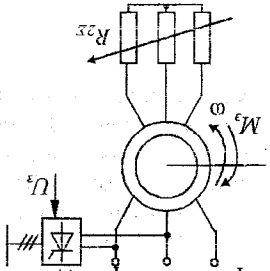


При прохождении постоянного тока I_n через обмотки статора возникает неподвижное постоянное магнитное поле. При вращении ротора рабочей машиной его проводники будут пересекать силовые магнитные линии неподвижного поля, в результате чего в обмотке ротора будет индуцироваться э.д.с. и протекать тормозной ток (если обмотка замкнута на сопротивление).

При подключении обмоток статора к источнику постоянного тока схемы соединения обмоток могут быть различными (рис. 4.20).

При прохождении постоянного тока I_n через обмотки статора возникает неподвижное постоянное магнитное поле. При вращении ротора рабочей машиной его проводники будут пересекать силовые магнитные линии неподвижного поля, в результате чего в обмотке ротора будет индуцироваться э.д.с. и протекать тормозной ток (если обмотка замкнута на сопротивление).

Рис. 4.19. Схема включения АД с фазным ротором в режиме динамического торможения с независимым возбуждением



Принципиальная схема включения АД в режиме динамического торможения приведена на рис. 4.19.

мощности, а для АД большой мощности - отдельных генераторов или статических преобразователей постоянного напряжения.

Анализ работы АД в режиме динамического торможения достаточно прост, если предположить, что по обмоткам статора протекает не постоянный ток, а эквивалентный ему переменный. При этом, в качестве условия эквивалентности используется равенство магнитодвижущих сил (м.д.с.), создаваемых постоянным и эквивалентным ему переменным током.

Амплитуда м.д.с., создаваемой переменным током, определяется выражением:

$$F_{\sim} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_{\text{эке}} \cdot w_1, \quad (4.46)$$

где w - число витков одной фазы обмотки статора; $I_{\text{эке}}$ - действующее значение эквивалентного постоянного тока, протекающего через обмотки статора, переменного тока.

Амплитуда результирующей м.д.с., создаваемой постоянным током, зависит от схемы включения обмоток статора. Например, на рис.4.21. показана схема соединения обмоток и соответствующая ей векторная диаграмма.

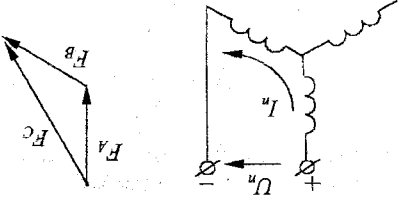


Рис. 4.21. Схема соединения обмоток и векторная диаграмма м.д.с. АД

Модуль м.д.с., создаваемой постоянным током в этом случае

$$F_{\sim} = \sqrt{3} I_n \cdot w_1, \quad \text{или с учетом того, что } F_{\sim} = F_{-},$$

$$F_{-} = \sqrt{3} I_n w_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} I_{\text{эке}} w_1. \quad (4.47)$$

Выражение для эквивалентного тока:

$$I_{\text{эке}} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_n.$$

Для схемы включения рис.4.20,б результирующая м.д.с. показана на рис.4.22.

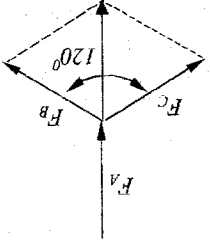


Рис. 4.22. Векторная диаграмма м.д.с. АД при питании обмотки статора постоянным током по схеме рис. 4.20, б.

Выражение для эквивалентного тока в этом случае получим из выражения $F_{-} = I_n \cdot w_1 = \frac{2}{3} I_{\text{эке}} w_1$:

$$I_{\text{эке}} = \frac{I}{\sqrt{2}} I_n. \quad (4.48)$$

Для схемы включения рис. 4.20, в) векторная диаграмма м.д.с. представлена на рис. 4.23.

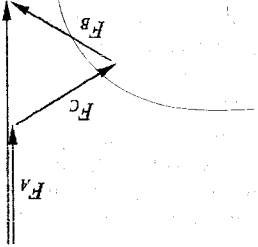


Рис. 4.23. Векторная диаграмма м.д.с. асинхронного двигателя при питании обмотки статора по схеме рис. 4.20, в).

Выражение для эквивалентного тока для этого случая получим с учетом того, что $F_{-} = 2 I_n w_1$:

$$I_{\text{эке}} = \frac{2\sqrt{2}}{3} I_n. \quad (4.49)$$

Определив величину эквивалентного тока, протекающего в обмотке статора машины, при дальнейшем расчете двигателя можно считать питанием от источника переменного тока. В соответствии со сказанным схема замещения двигателя в режиме динамического торможения будет иметь вид, приведенный на рис. 4.24.

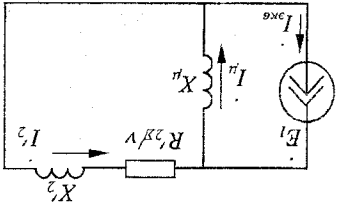


Рис. 4.24. Схема замещения асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

В схеме замещения приняты следующие обозначения:

$$R_{2\mu}^2 = R_2^2 + R_{2\mu 0}^2; \quad \omega = \frac{\omega_0}{s} - \text{скольжение ротора } \Delta \text{ в режиме динамического торможения.}$$

Чтобы установить зависимость, описывающие свойства и

характеристики $\Delta \Pi$, следует учесть следующую особенность режима динамического торможения. В двигательном режиме ток намагничивания магнитный поток машины остается практически неизменным при любых нагрузках и скоростях, что можно объяснить следующим образом. При прохождении тока по обмотке статора возникает переменное магнитное поле, которое пронизывает также и витки обмотки ротора. В соответствии с законом Ленца возникающие в роторе магнитовытесняющие силы направлены таким образом, чтобы уменьшить намагничивающее действие главного

тока. При этом уменьшение потока приводит к уменьшению э.д.с., наводимой в статоре и направленной против приложенного напряжения, благодаря чему растет ток статора и поток двигателя практически восстанавливается. В режиме динамического торможения поток двигателя изменяется в широких пределах. Объясняется это тем, что изменение за счет нагрузки или скорости магнитовытесняющих сил ротора, оказывающих размагничивающее влияние на машину, в данном случае не может быть ничем скомпенсировано, т.к. по цепи статора течет постоянный ток и соответственно магнитный поток и э.д.с. остаются по неизменными

величине.

Если воспользоваться векторной диаграммой токов (рис. 4.25), то можно показать, что в режиме динамического торможения, когда $I_{\mu 0} = \text{const}$, а величина э.д.с. ротора, реактивное сопротивление и, следовательно, ток ротора находятся в прямой зависимости от скорости вращения, изменение I_2' приводит к изменению результирующего потока, а значит и тока I_{μ} .

Так, при неподвижном роторе ток в его обмотке равен нулю и $I_{\mu 0} = I_{\mu}$, т.е. машина будет наиболее намагниченной. С ростом скорости возрастает ток I_2' и фазовый угол Φ_2 , в результате чего намагничивающий ток I_{μ} и результирующий поток резко снижаются благодаря размагничиванию со стороны ротора.

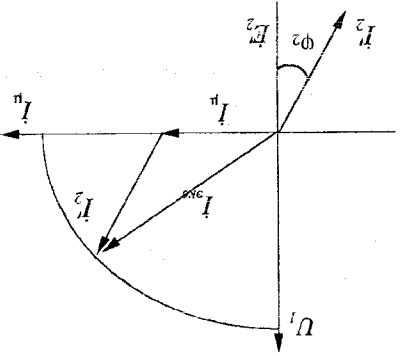


Рис. 4.25. Векторная диаграмма токов для режима динамического торможения

Эквивалентный ток статора и приведенный ток ротора связаны векторным соотношением:

$$I_{\mu 0} = I_{\mu} + I_2' \quad (4.50)$$

Выразим модуль $I_{\mu 0}$ исходя из векторной диаграммы:

$$I_{\mu 0}^2 = (I_{\mu} + I_2')^2 \cdot \sin^2 \Phi_2 + I_2'^2 \cdot \cos^2 \Phi_2 \quad (4.51)$$

В свою очередь, ток I_{μ} можно выразить из схемы замещения:

$$I_{\mu} = \frac{E_2'}{X_2'} = \frac{X_{\mu}}{I_2' \cdot \sqrt{\left(\frac{R_2'}{X_2'}\right)^2 + (X_2')^2}} \quad (4.52)$$

Подставив в (4.51) выражение (4.52) после преобразований получим следующее выражение для приведенного тока ротора:

$$I_2' = \frac{I_{\mu 0} \cdot X_{\mu}}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{X_2'}\right)^2 + (X_2')^2}} \quad (4.53)$$

Выражение (4.53) представляет собой скоростную характеристику $\Delta \Pi$ в режиме динамического торможения. Используя уравнение баланса мощностей, можно записать уравнение механической характеристики:

$$M = \frac{m I_2'^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{v}{R_2'^2}} = \frac{m I_{\mu 0}^2 \cdot X_{\mu}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{v}{R_2'^2} \cdot \left[\left(\frac{R_2'}{X_2'}\right)^2 + (X_2')^2 \right]} \quad (4.54)$$

Критическое скольжение в режиме динамического торможения:

$$S_{kp(om)} = v_{kp} = \frac{R_{22}}{X'' + X_2'} \quad (4.55)$$

Следует отметить, что критическое скольжение в режиме динамического торможения намного меньше, чем в двигательном режиме, так как $X'' > X_1$.

Критический момент равен

$$M_{kp} = \frac{m_{22} \cdot X_2' \cdot X''}{2\omega_0 [X'' + X_2']} \quad (4.56)$$

Уравнение механической характеристики АД в режиме ДТ по формуле Кюоса:

$$M = \frac{2M_{kp}}{\frac{v}{s_{kp}} + \frac{v}{s_{kp}}}$$

Вид механических характеристик АД в режиме динамического торможения приведен на рис. 4.26.

Анализ механических характеристик в режиме динамического торможения позволяет сделать следующие выводы.

В первом приближении механическая характеристика асинхронного двигателя в режиме ДТ описывается уравнением, аналогичным уравнению в двигательном режиме, но при иных значениях критического момента и критического скольжения.

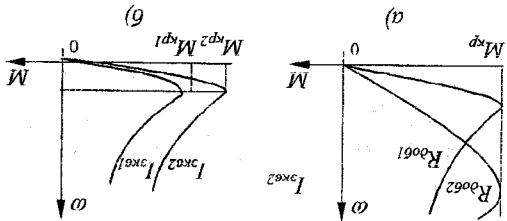


Рис. 4.26. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения: а) - для различных значений добавочного сопротивления в цепи ротора; б) - для различных значений тока возбуждения в режиме.

Критическое скольжение на естественной характеристике в режиме динамического торможения значительно меньше, чем в двигательном режиме. С увеличением тока возбуждения возрастает степень насыщения машины, в результате чего индуктивное сопротивление контура намагничивания уменьшается и соответственно увеличивается критическое скольжение.

Критический момент не зависит от сопротивления роторной цепи и пропорционален квадрату тока возбуждения ($I_{ск}^2$).

4.4. Основные методы регулирования скорости асинхронных двигателей с фазным ротором

Существуют различные способы регулирования скорости АД. Однако, следует отметить, что каждый из способов позволяет получить искусственные характеристики, имеющие как определенные преимущества, так и некоторые недостатки относительно электромеханических свойств двигателя. Наиболее распространенными из всех существующих способов регулирования скорости являются:

- введение в цепь ротора добавочного активного сопротивления (реостатный способ регулирования скорости);
- введение в цепь статора или ротора индуктивного добавочного сопротивления;
- переключение числа пар полюсов;
- изменение напряжения на статоре АД;
- изменение частоты напряжения питания асинхронного двигателя (частотное регулирование);
- введение в цепь ротора добавочной э.д.с. (регулирование скорости в каскадных схемах).

4.4.1. Реостатный метод регулирования скорости асинхронного двигателя

Этот способ применим только для АД с фазным ротором, конструктивные особенности которых позволяют возможность вводить в цепь ротора добавочные сопротивления. Схема включения АД при реостатном способе регулирования скорости вращения приведена на рис. 4.27.

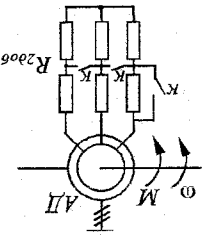


Рис. 4.27. Схема включения добавочных сопротивлений в цепь ротора АД при регулировании скорости вращения реостатным способом.

Чтобы установить вид искусственных характеристик и их свойства, запишем уравнение баланса мощностей в цепи ротора и решим его относительно скольжения:

$$M_{\omega 0} S = m I^2 R_{22}, \quad \text{где } R_{22} = R_2 + R_{206}.$$

Откуда

$$s = \frac{m I^2 R_{22}}{M_{\omega 0}}.$$

Из выражения (4.59) очевидно, что скольжение s оказывается пропорциональным сопротивлению роторной цепи. Поэтому увеличение суммарного сопротивления цепи ротора R_{22} при введении добавочного сопротивления R_{206} при одной и той же нагрузке приведет к снижению скорости вращения двигателя.

Синхронная скорость двигателя на искусственных характеристиках

$$\omega_{0n} = \frac{p}{2\pi f_c}$$

остается неизменной, т.к. не зависит от сопротивления цепи ротора R_{22} . Следовательно, графики всех искусственных (роторных) характеристик будут выходить из одной точки.

Величина критического скольжения

$$s_{kp.n.} = \pm \frac{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}{R_{22}}.$$

также возрастает с увеличением R_{22} .

Критический момент остается неизменным:

$$M_{kp.n.} = \frac{2\omega_0 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K^2}]}{m U_{1\phi}^2},$$

а пусковой момент с увеличением R_{22} возрастает:

$$M_{пв.н.} = \frac{m U_{1\phi}^2 R_{22}}{\omega_0 [(R_1 + R_{22})^2 + X_K^2]}.$$

Эти выводы позволяют представлять семейство механических характеристик при роторном способе регулирования (рис. 4.28).

Анализируя роторные механические характеристики, можно сделать следующие выводы:

- при введении добавочного сопротивления в цепь ротора регулирования скорости A/Δ в двигательном режиме возможно только вынужденное (в генераторном режиме введение R_{206} , наоборот, приводит к увеличению скорости);
- механические характеристики получаются более мягкими; критический момент одинаков для всех характеристик ($M_{kp} = \text{const}$);
- с увеличением добавочного сопротивления пропорционально увеличивается рабочее и критическое скольжение;
- метод прост в отношении его технической реализации;

Пределы регулирования скорости зависят от степени загрузки двигателя, сужаясь с уменьшением нагрузки.

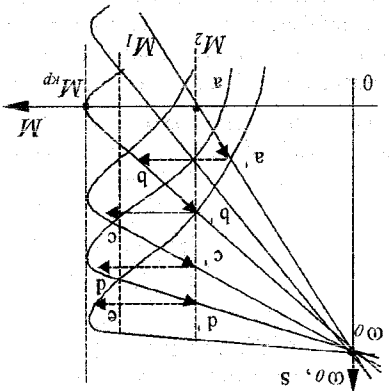


Рис. 4.28. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя введением добавочного активного сопротивления в цепь ротора. Недостатками этого способа являются:

- снижение жесткости характеристики;
- увеличение электрических потерь в цепи ротора;
- возможность осуществления только ступенчатого регулирования.

Эти положения обуславливают применение этого способа в электродвигателях, не предназначенных для длительного режима работы на постоянных скоростях.

В основном этот способ используется для роторного запуска A/Δ средних и большой мощности с целью снижения пусковых токов (при одновременном увеличении пускового момента). Таким образом исключается "начальный удар" в рабочей машине при ее прогоне.

При запуске двигателя и регулирования скорости с помощью реостатов в роторной цепи необходимо предусматривать меры, исключающие выход характеристик двигателя при переключении резисторов на неустойчивую часть. Вследствие этого необходимо контролировать ток двигателя, а также его скорость. Это реализуется путем создания замкнутой системы управления в функции тока с коррекцией по скорости или по времени.

4.4.2. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением индуктивного сопротивления

Введение в цепь статора реакторов с подмагничиванием (дросселей насыщения).

4.30. Схема включения двигателя имеет вид, представленный на рис.

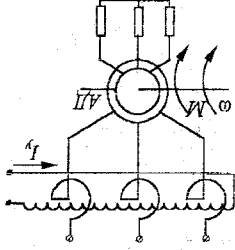


Рис. 4.29. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя

изменением индуктивного сопротивления в цепи статора

Этот способ обеспечивает плавное регулирование скорости ΔI в широких пределах. В качестве дополнительных регулирующих индуктивных сопротивлений, изменяющих подводимое к статору напряжение, используют реакторы с подмагничиванием. При изменении тока в обмотке управления I_u изменяется индуктивное сопротивление реактора. При этом наибольшее значение индуктивного сопротивления реактора соответствует току управления $I_u = 0$ и снижается при увеличении I_u .

Дискроматный момент ΔI :

$$M_{\Delta I} = \frac{m U_{\phi}^2 R_2 s}{\omega_0 [R_2^2 + s^2 (X_1^2 + X_2^2)]} \quad (4.64)$$

где $X_1^2 = X_1 + X_{1\Delta I}$ — суммарное сопротивление цепи статора.

Для рабочей части характеристики, когда скольжение мало

$$R_2 \gg s (X_1^2 + X_2^2),$$

электроматный момент

$$M_{\Delta I} \approx \frac{m U_{\phi}^2 R_2}{\omega_0 R_2^2} \quad (4.65)$$

Остало видно, что при снижении напряжения скорости вращения двигателя уменьшается. Соответствие уменьшается критический и

Характеристики имеют вид, представленные на рис. 4.30.

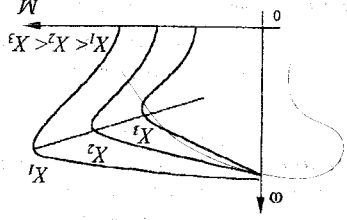


Рис. 4.30. Механические характеристики асинхронного двигателя при введении добавочного индуктивного сопротивления в цепь статора

Введение индуктивного сопротивления в цепь ротора

Двигатель включается в соответствии со схемой (рис. 4.31).

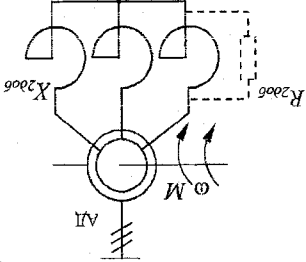


Рис. 4.31. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя

введением добавочного индуктивного сопротивления в цепь ротора. Кроме того, как следует из выражения для электроматного и критического моментов двигателя

$$M_s = \frac{m U_{\phi}^2 R_2}{\omega_0 s \left[R_1^2 + \frac{s^2}{2} (X_1^2 + X_2^2) \right]} = \frac{m U_{\phi}^2 R_2}{\omega_0 s \left[R_1^2 + R_2^2 + X_k^2 s^2 \right]} \quad (4.65)$$

$$M_{kp} = \frac{m U_{\phi}^2}{2 \omega_0 X_k} : s_k = \frac{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}{R_2} \quad (4.66)$$

где $X_k = X_1 + X_2 + X_p$,

увеличение индуктивного сопротивления в роторной цепи приводит к уменьшению критического скольжения, критического и пускового моментов, что позволяет повысить жесткость механических характеристик (рис. 4.32, а). Если параллельно добавочному индуктивному сопротивлению в цепи ротора включить активное сопротивление, то при запущенном токе ротора будет проходить, в основном, через активное сопротивление $R_{2\Delta I}$, шунтирующее индуктивное сопротивление $X_{2\Delta I}$, а по мере увеличения скорости (то есть по мере уменьшения суммарного индуктивного сопротивления), весь ток практически замыкается через индуктивное сопротивление, шунтируя тем самым $R_{2\Delta I}$. Благодаря такому перераспределению тока между активным и индуктивным сопротивлением характеристика ΔI имеет вид эскаваторной (рис. 4.32, б): первый участок — характеристика жесткая (по значению $I_2 \approx I_H$), второй участок — стопорный (при токах $I_2 > I_{2H}$).

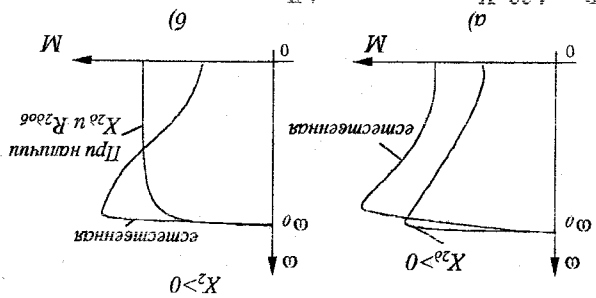


Рис. 4.32. Характеристики ΔI при введении в цепь ротора активно-индуктивного сопротивления: а) в схеме с индуктивным добавочным сопротивлением; б) в схеме с индуктивно-активным сопротивлением

Введение в цепь ротора индуктивно-емкостных сопротивлений

Схема включения в цепь ротора асинхронного двигателя емкости последовательно с добавочным индуктивным сопротивлением показана на рис. 4.33.

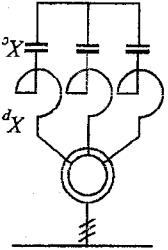


Рис. 4.33. Регулирование скорости вращения ΔI введением в цепь ротора индуктивно-емкостного сопротивления

Индуктивное сопротивление реактора можно выразить следующим образом:

$$X_p = \Omega \cdot s \cdot L_p, \quad \Omega = 2\pi f_2; \quad f_2 = f_1 \cdot s. \quad (4.67)$$

где Ω - кротовая частота в цепи ротора, зависящая от скольжения:

$$\Omega = 2\pi f_2; \quad f_2 = f_1 \cdot s. \quad (4.68)$$

При равенстве индуктивного сопротивления емкостному $X_p = X_c$ в такой цепи возможен резонанс напряжений, так как $\Omega L = \frac{\Omega C}{I}$, что возможно при скольжении, равном:

$$s_{kp} = \sqrt{\frac{\Omega^2 L C}{I}}. \quad (4.69)$$

Ток ротора приобретает чисто активный характер, и момент при этом становится максимальным. Вид механической характеристики асинхронного двигателя в рассмотренной схеме приведен на рис. 4.34.

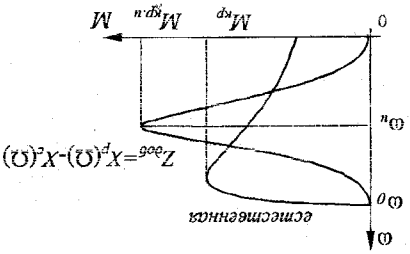


Рис. 4.34. Механическая характеристика ΔI при введении в цепь ротора индуктивно-емкостного сопротивления

В рабочей зоне характеристика ΔI становится подобной характеристике двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, а непрерывная способность двигателя при работе со скольжениями, близкими к критическому, значительно возрастает.

4.4.3. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя посредством числа пар полюсов

Между синхронной скоростью и числом пар полюсов ΔI существует известное соотношение

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}.$$

Следовательно, изменяя число полюсов, можно изменить и синхронную скорость. При этом увеличение числа пар полюсов приводит к снижению синхронной скорости и наоборот. Применяют этот способ, в основном, только для короткозамкнутых ΔI , когда достаточно изменить только число полюсов обмотки на статоре, ротор же приспособлен для любого числа полюсов. Один из приемов изменения числа полюсов - это укладка на статоре ΔI нескольких обмоток на различные число полюсов. Изменять скорость в этом случае можно путем включения той или иной обмотки. Однако, этот прием дает значительное увеличение табаритов двигателя, усложняет его конструкцию, повышает стоимость. Другой способ изменения количества пар полюсов - это деление каждой фазной обмотки на части и переключение ее. В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются специальные серии многоскоростных асинхронных двигателей, имеющие 2, 3 или 4 скорости вращения.

Чтобы установить вид характеристик A/Δ при регулировании данным способом, обратимся к выражению максимального момента:

$$M_{kp} \approx \frac{m U_{i\phi}^2}{2 \omega_0 X_k}$$

из которого очевидно, что M_{kp} обратно пропорционален $X_k = X_1 + X_2$.

В свою очередь сопротивление X_1 зависит от числа витков обмотки статора, которое может быть различным для различных обмоток или частей одной обмотки. Сопротивление X_2 также зависит от числа витков обмотки статора, поскольку в формулу для его вычисления входит коэффициент трансформации. Таким образом, при увеличении числа пар полюсов механическая характеристика A/Δ будет иметь такой же вид, как и для основного числа полюсов, но при этом максимальный момент и синхронная скорость вращения изменятся следующим образом:

- с увеличением числа пар полюсов X_k уменьшается, критический момент M_{kp} возрастает, ω_0 снижается, ω возрастает.
- Механические характеристики для рассматриваемого способа приведены на рис. 4.35.

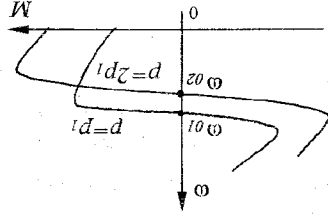


Рис. 4.35. Механические характеристики A/Δ при изменении числа пар полюсов

Чтобы поддерживать $M_{kp} = const$, необходимо использовать замкнутые системы ЭП, позволяющие одновременно с числом пар полюсов изменять уровень напряжения на статоре двигателя.

- возможность только ступенчатого регулирования скорости;
- регулирование экономично, не связано с существенными потерями энергии (хотя при увеличении числа пар полюсов несколько увеличивается электрические и магнитные потери);
- нечувствительные механические характеристики имеют такую же жесткость, как и естественная;
- способ прост в реализации.

Недостатки:
- возможность получения ограниченного числа характеристик;

- величина критического момента зависит от схемы включения;
- с увеличением числа характеристик число выводов обмотки также увеличивается, что приводит к усложнению и громоздкости коммутационного устройства.

4.4.4. Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением напряжения на статоре

Одним из возможных способов регулирования скорости A/Δ является изменение величины напряжения на статоре двигателя при неизменной частоте, равной частоте сетевого напряжения f_c . Схема для реализации такого способа представлена на рис. 4.36.

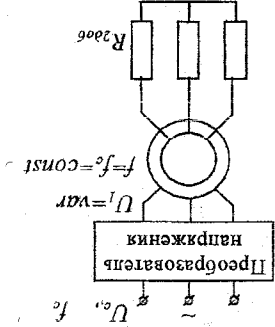


Рис. 4.36. Схема включения A/Δ при регулировании скорости вращения изменением напряжения на статоре

Между выводами питающей сети и статора асинхронного двигателя включен преобразователь напряжения (ТН), обеспечивающий изменение величины напряжения, подводящего к A/Δ . Вид механических характеристик, получаемых этим способом, можно установить исходя из следующих положений:

- синхронная скорость $\omega_0 = \frac{2\pi f_c}{p}$ - остается неизменной;
- критический момент $M_{kp} \approx \frac{m U_{i\phi}^2}{2 \omega_0 X_k}$ - при ненасыщенном двигателе изменяется пропорционально квадрату напряжения (U^2);
- критическое скольжение $s_{kp} \approx \frac{X_k}{R_2}$ - остается неизменным.

Механические характеристики имеют вид, приведенный на рис. 4.37.

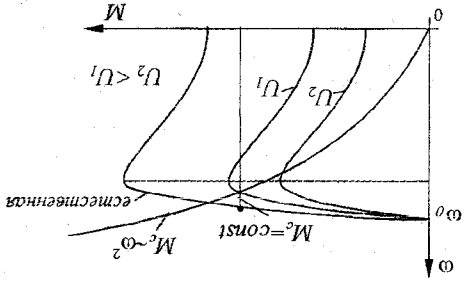


Рис. 4.37. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения на статоре

Из графика видно, что искусственные характеристики, получаемые в данном случае, оказываются малопригодными для целей регулирования скорости, т.к. по мере уменьшения напряжения резко уменьшается критический момент и снижается переключающая способность АД. Диапазон регулирования скорости очень мал, т.к. регулирование осуществляется в узком диапазоне от основной скорости в пределах $10 \div 20\%$. Несколько шире он становится в случае вентильной нагрузки на валу АД. По этим причинам в разомкнутых системах рассматриваемый способ можно использовать только для регулирования момента АД и его тока, который также пропорционален напряжению ($I_2 \sim U_1$). Для регулирования скорости, как правило, используют замкнутые системы с обратной связью по скорости.

Для технической реализации этого способа регулирования в качестве регуляторов напряжения, способных автоматически поддерживать необходимое напряжение при работе с малыми скоростями используют различные устройства, включаемые в цепь статора (автотрансформаторы, дроссели насыщения или наиболее широко применяемые в последнее время тиристорные регуляторы напряжения - ТРН).

Схема привода в замкнутой системе регулирования скорости с применением ТРН имеет вид (рис. 4.38).

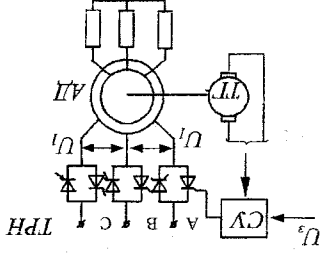


Рис. 4.38. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя в замкнутой системе ТРН-АД

Напряжение на статоре асинхронного двигателя регулируется путем изменения угла управления тиристоров.

Вид механических характеристик асинхронного двигателя в системе ТРН - АД показан на рис. 4.39:

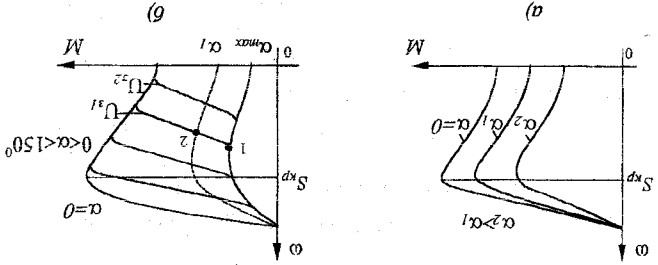


Рис. 4.39. Механические характеристики асинхронного двигателя в системе ТРН-АД: а) в разомкнутой системе; б) в замкнутой системе

Из характеристик видно, что контур обеспечивает изменение напряжения при константных нагрузках.

Предположим, что двигатель работает в точке 1 на характеристике, соответствующей углу управления α_{max} . При увеличении нагрузки на валу пропорлирует некоторое уменьшение скорости, при этом сигнал на систему управления ТРН равен $U_y = U_z - U_{oc}$ увеличивается. Вследствие этого угол управления α уменьшится, напряжение на статоре возрастет и изменение скорости будет скомпенсировано за счет увеличения момента двигателя.

Достоинства способа:

- простота и надежность;
- возможность плавного регулирования;

- широкий диапазон регулирования скорости и момента.

Основным недостатком является невысокий КПД за счет больших потерь энергии скольжения ($\Delta P_{sc} \sim s$). Поэтому приходится либо завывать мощность АД либо использовать специальные двигатели, рассчитанные на повышенное скольжение.

4.4.5. Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением частоты питающего напряжения

Этот способ обеспечивает наилучшие показатели по сравнению со всеми другими способами и позволяет использовать даже наиболее простой тип асинхронного двигателя - с короткозамкнутой ротором.

Возможность регулирования скорости вращения АД изменением частоты обусловлена зависимостью величины синхронной скорости от частоты напряжения питания двигателя:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$$

В общем случае скорость вращения двигателя пропорциональна частоте f_1 напряжения, подводимого к статору:

$$\omega = \omega_0 (1 - s) = \frac{2\pi f_1}{p} (1 - s). \quad (4.70)$$

Однако изменение только частоты питающего напряжения негативно влияет на механические характеристики двигателя. Так как индуктивное сопротивление обмоток

$$X_K = 2\pi f_1 L_K, \quad (4.71)$$

зависит от частоты, то несложно видеть, что максимальный момент двигателя

$$M_{br} \approx \frac{m L_0^2}{2\omega_0 X_K} \approx \frac{2 \cdot 2\pi f_1 2\pi f_1 L_K}{m U_{10}^2 \cdot p} = A \frac{U_1^2}{f_1^2}, \quad (4.72)$$

$$\text{где } A = \frac{8\pi^2 L_K^*}{mp}.$$

обратно пропорционален квадрату частоты, поэтому при уменьшении частоты он возрастает и, наоборот, с увеличением частоты - уменьшается, что приводит к снижению перерывочной способности двигателя. Кроме того, уменьшение частоты f_1 приводит к уменьшению индуктивного сопротивления намагничивающего контура:

$$X_H = 2\pi f_1 L_H,$$

следовательно ток намагничивания

$$I_H \approx \frac{U_c}{U} X_H = \frac{2\pi f_1 L_H}{U}. \quad (4.73)$$

с уменьшением частоты возрастает, и соответственно увеличивается магнитный поток машины Φ . Это приводит, во-первых, к насыщению стали, что отрицательно сказывается на ее магнитных свойствах, а во-вторых, в связи с ростом I_H индуктивность контура намагничивания (рис. 4.7) уменьшается, что приводит к еще большему уменьшению индуктивного сопротивления $X_H = 2\pi f_1 L_H$, а следовательно, еще большему увеличению тока намагничивания I_H . Таким образом, при снижении частоты возникает угроза повышения нагрева статорной обмотки.

При $f_1 > f_{ном}$ магнитный поток двигателя будет уменьшаться, а это означает, что при номинальной нагрузке на валу

$$M_c = M_H = k \Phi \cdot I_{\Sigma} \cdot \cos \varphi_2, \quad (4.74)$$

ток в роторе и статоре превысит номинальный, что вызовет перегрев обмоток.

Характеристики A/Δ при изменении частоты питающего напряжения приведены на рис. 4.40.

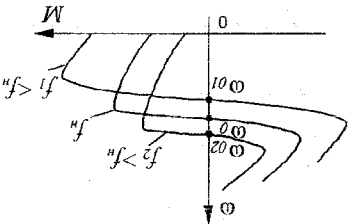


Рис. 4.40. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении частоты питающего напряжения

Жесткость механических характеристик на рабочем участке остается неизменной. Изменение критического момента наблюдается только в области частот порядка 5-7 Гц.

Расчетные выше особенности поведения асинхронного двигателя и свойства его механических характеристик при регулировании скорости вращения изменением частоты питающего напряжения приводят к следующему выводу. Для получения нормальных рабочих режимов двигателя, обеспечивающих его полное использование, необходимо периодически с изменением частоты изменять и амплитуду питающего напряжения.

При этом наилучшее использование A/Δ достигается при регулировании напряжения в функции частоты и нагрузки. В общем виде зависимость между этими параметрами, называемая законом частотного регулирования, устанавливается, исходя из технологических требований (например, с целью поддержания постоянства магнитного потока машины, или постоянства перерывочной способности и т.п.):

$$U^2 \cdot f^{2+s} = const. \quad (4.75)$$

В частности, для выполнения условия $\Phi = const$, необходимо чтобы

$$I_H = const, \text{ т.е. } \frac{U_{1\Phi}}{U} = \frac{X_H}{2\pi f_1 L_H} = const,$$

или

$$\frac{U}{f} = const. \quad (4.76)$$

Механические характеристики A/Δ для закона частотного регулирования (4.76) будут иметь вид, приведенный на рис. 4.41.

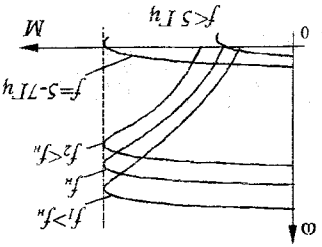


Рис. 4.41. Механические характеристики асинхронного двигателя для закона

$$\frac{\omega}{U} = \text{const}$$

Максимальный момент двигателя на любой характеристике в этом

случае остается неизменным:

$$M_{kp} = \frac{U^2}{I_\Phi^2} \approx A \frac{f_1^2}{f_2^2} = \text{const.}$$

Т.к. здесь не учитывается активное сопротивление статора, то при $f < 5-7 \text{ Hz}$ формула дает существенную погрешность в сторону завышения значения

критического момента.

Анализируя сказанное выше, можно сделать следующие выводы.

Изменение частоты источника питания позволяет регулировать

скорость АД как выше, так и ниже синхронной. Верхний предел регулирования связан с конструктивными особенностями АД и равен 1,5-2,0

кратному. С увеличением частоты возрастают потери в стали.

Регулирование скорости вниз от основной возможно в диапазоне 1:1,5-2,0 (нижний предел ограничен сложностью реализации источника питания с

низкой частотой).

В области частот, близких к f_n , характеристики практически параллельны, однако при малых частотах ($f \leq 5-7 \text{ Hz}$) эта зависимость

нарушается.

Техническая реализация частотного регулирования скорости АД возможна при использовании электронных преобразователей частоты или

(например, СТ, работающих с переменной частотой вращения) или статических вентильных преобразователей частоты. Последние в настоящее

время получили наиболее широкое развитие и применение в

4.4.6. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя введенным в цепь ротора добавочной э.д.с.

Один из способов регулирования скорости вращения АД основан на введении в ротор добавочной э.д.с. той же частоты, что и э.д.с. ротора асинхронной машины. Поэтому, прежде всего, этот способ применим только для АД с фазным ротором.

Чтобы понять сущность этого способа, рассмотрим процесс преобразования энергии в асинхронном двигателе с фазным ротором (рис. 4.42).

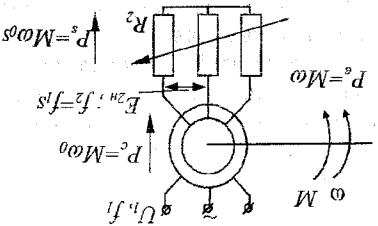


Рис. 4.42. Преобразование энергии в асинхронном двигателе

Как видно из рисунка, энергия скольжения в обычной схеме включения асинхронного двигателя расходуется на потери в обмотке ротора:

$$\Delta P_{\text{ра}} = P_s - P_r = M\omega_0 - M\omega_s. \quad (4.77)$$

Ток в цепи ротора может быть определен в соответствии с выражением

$$I_2 = \frac{E_{2H} s}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_k^2}}. \quad (4.78)$$

Если, не изменяя момента нагрузки на валу двигателя (т.е. $I_2 = \text{const}$), ввести в ротор встречную э.д.с. той же частоты, то уравнение тока соответственно примет вид:

$$I_2 = \frac{E_{2H} s - E_{\text{доб}}}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_k^2}}, \quad (4.79)$$

что означает, что при заданной нагрузке при введении $E_{\text{доб}}$ двигатель будет работать уже с другим скольжением.

Предположим, что АД работает в двигательном режиме при $E_{\text{доб}} = 0$. Если к валу двигателя приложен некоторый момент $M_c = \text{const}$, то рабочая

точка - точка 1 (рис. 4.43) и ток в роторе двигателя определится как:

$$I_2 = \frac{E_{2H} s}{Z}. \quad (4.80)$$

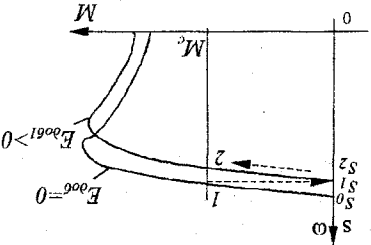


Рис. 4.43. Механические характеристики асинхронного двигателя при введении добавочной э.д.с. в цепь ротора

При введении в цепь ротора $L_{\text{доб}} = L_{\text{доб1}}$ часть энергии уже будет потребляться источником добовойной э.д.с., а количество энергии, выделяемой непосредственно в роторе уменьшится. Это приведет к тому, что ток в цепи ротора

$$I_2 = \frac{Z}{E_{2H} \cdot s - E_{\text{доб}}},$$

также уменьшится и, соответственно уменьшится электромагнитный момент двигателя. Следовательно, двигатель начнет замедляться. Но при уменьшении частоты вращения АД в процессе замедления скользящее будет увеличиваться, и соответственно будет увеличиваться э.д.с. ротора (E_{2H}). Увеличение э.д.с. ротора вновь приведет к увеличению тока ротора и его момента, но уже при меньшей частоте вращения. Когда электромагнитный момент вновь станет равным статическому моменту, наступит новый установившийся режим работы (точка 2). Таким образом, изменяя величину $L_{\text{доб}}$, можно регулировать скорость вращения АД.

Этот принцип заимован основой всех типов каскадных схем регулирования скорости АД. При этом источником добовойной э.д.с. могут выступать машины переменного или постоянного тока, либо статические преобразователи, работающие в инверсном режиме.

Одна из схем (машинно-вентильного каскада), применяемых для регулирования скорости вращения асинхронного двигателя введением добовойной э.д.с. в цепь ротора приведена на рис.4.44.

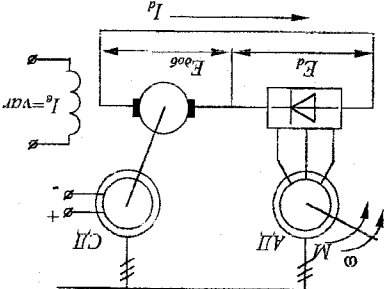


Рис. 4.44. Схема для регулирования скорости вращения АД введением добовойной э.д.с. в цепь ротора

Для приведенной выше схемы ток может быть определен в соответствии с выражением

$$I_d = \frac{R_{\text{доб}}}{E_d - E_{\text{доб}}} = k_{\text{сх}} E_{2H} \cdot s - E_{\text{доб}} R_{\text{доб}} \quad (4.81)$$

где $R_{\text{доб}}$ - приведенное к цепи постоянного тока суммарное сопротивление асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока.

Вид характеристик в такой схеме приведен на рис. 4.45.

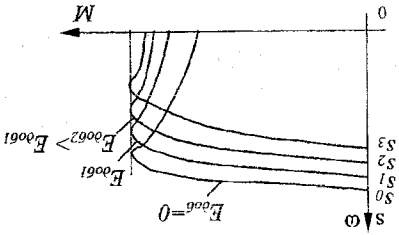


Рис. 4.45. Механические характеристики АД в схеме машинно-вентильного каскада

Механические характеристики, получаемые этим способом регулирования, имеют почти неизменную жесткость, которая несколько меньше, чем в естественной схеме включения и постоянный по величине критический момент. Регулирование скорости осуществляется вниз от основной, а энергия скопления (P_s) возвращается в сеть.

4.5. Несимметричные режимы работы асинхронного двигателя с фазным ротором

Несмотря на то, что асинхронный двигатель в отношении простоты, надежности, относительной дешевизны в значительной степени превосходит все остальные типы двигателей, в естественной схеме включения он не может конкурировать с ДПТ в отношении регулирования скорости, тормозных и пусковых качеств. Вследствие этого с момента появления АД инженерная мысль была направлена на создание специальных схем включения, которые бы позволили улучшить эти качества АД. Среди таких схем включения особо следует выделить следующие:

- схемы включения статора АД на несимметричное напряжение (несимметрия питающего напряжения);
- схемы несимметричного включения сопротивления цепи ротора (несимметрия роторных сопротивлений);
- несимметричные режимы работы асинхронного двигателя также возникают как аварийные, например, при обрыве одной из фаз, коротких замыканий и т.п. Рассмотрим особенности работы и характеристики двигателя в различных несимметричных режимах.

4.5.1. Несимметрия напряжения на статоре

Несимметрия напряжения, подводимого к статору АД, может быть амплитудной и фазной. В первом случае это достигается путем включения в цепь статора однофазного автотрансформатора, как показано на рис. 4.46.

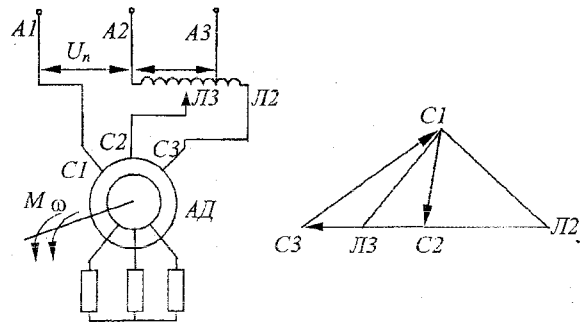


Рис. 4.46. Схема включения асинхронного двигателя с автотрансформатором и диаграмма фазных напряжений

Перемещая ползунок автотрансформатора, можно уменьшить или увеличить асимметрию напряжений. Диаграмма напряжений на статоре двигателя, приведена на рис. 4.46 (жирной линией изображена диаграмма при несимметричном напряжении).

Как известно из курса ТОЭ, несимметричную трехфазную систему без нулевого провода можно представить в виде суммы двух симметричных трехфазных систем — прямой и обратной чередования фаз (рис.4.47):

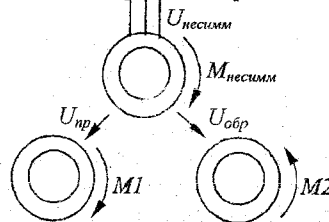


Рис. 4.47. Разложение на составляющие несимметричной трехфазной системы без нулевого провода на прямую и обратную симметричные составляющие моментов двигателя

Можно считать, что при несимметричном питании в двигателе будут создаваться две магнитодвижущие силы, вращающиеся в противоположных направлениях. От каждой из которых возникает свой магнитный поток. Последние, в свою очередь, будут индуцировать в роторе свои э.д.с., которые создадут соответствующие системы токов. Взаимодействие магнитного потока прямого направления вращения с токами ротора прямого чередования фаз создает движущий момент в положительном направлении. Аналогично магнитный поток обратного направления и соответствующая система токов создают момент обратного направления. Таким образом, результирующий момент на валу будет равен алгебраической сумме обоих моментов. Взаимодействие магнитных потоков и токов противоположных

систем чередования фаз будут создавать пульсирующие моменты, средняя величина которых будет равна нулю.

Фазные напряжения прямого (U_{np}) и обратного (U_{obr}) следования можно найти, определив симметричные линейные напряжения простым геометрическим построением (рис. 4.48).

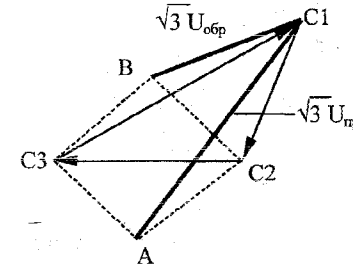


Рис. 4.48. Графическое определение симметричных составляющих напряжения прямой и обратной последовательности

Вначале строят треугольник несимметричных линейных напряжений ($\Delta C_1 C_2 C_3$), а затем на одном из его катетов (например, $C_2 C_3$) строят вспомогательные равнобедренные треугольники ($\Delta C_2 C_3 B$ и $\Delta C_2 C_3 A$). Соединив вершину C_1 с точками B и A получают в соответствующем масштабе значения линейных напряжений U_{np} (отрезок $C_1 A$) и U_{obr} (отрезок $C_1 B$), соответственно, для симметричных систем прямой и обратной последовательности.

Исходя из того, что критический момент пропорционален квадрату напряжения на статоре ($M_{kp} \sim U^2$), по найденным симметричным составляющим фазных напряжений могут быть определены значения соответствующих критических моментов, как

$$M_{kp,пр} = M_{kp,e} \left(\frac{U_{np}}{U_n} \right)^2, \quad (4.82)$$

$$M_{kp,обр} = -M_{kp,e} \left(\frac{U_{obr}}{U_n} \right)^2. \quad (4.83)$$

Используя формулу Клосса, можно записать выражения для моментов прямой и обратной последовательности при любом скольжении $s < 1$:

$$M_I(s) = M_{kp,e} \left(\frac{U_{np}}{U_n} \right)^2 \frac{2}{\frac{s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s}}; \quad (4.84)$$

$$M_{2(s)} = -M_{кр.e} \left(\frac{U_{обр}}{U_n} \right)^2 \frac{2}{\frac{2-s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{2-s}}, \quad (4.85)$$

где $(2-s)$ - это скольжение ротора относительно магнитного потока обратной последовательности (рис. 4.49).

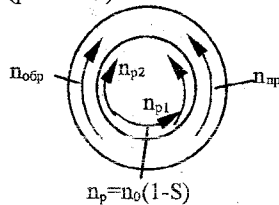


Рис. 4.49. Магнитодвижущие силы прямой и обратной последовательности при питании статора несимметричным напряжением.

Обозначения принятые на рис. 4.49: $n_{пр}$; $n_{об}$ - скорости вращения прямого и обратного магнитного потока; $n_{пр} = n_0$; $n_{об} = -n_0$.

Скорость вращения ротора по отношению к прямому полю:

$$n_{p1} = n_{пр} - n_p = n_0 - n_0(1-s) = n_0 s.$$

Скорость вращения ротора по отношению к обратному полю:

$$n_{p2} = n_{об} - n_p = -n_0 - n_0(1-s) = -n_0(2-s),$$

откуда явно видно, что величина скольжение ротора относительно поля обратной последовательности равна $(2-s)$.

Результирующий момент на валу двигателя:

$$M_{\Sigma} = M_{1(s)} + M_{2(s)} = M_{кр.e} \left(\frac{U_{пр}}{U_n} \right)^2 \frac{2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} - M_{кр.e} \left(\frac{U_{обр}}{U_n} \right)^2 \frac{2}{\frac{2-s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{2-s}}. \quad (4.86)$$

Механическая характеристика в случае отсутствия добавочного сопротивления в цепи ротора будет иметь вид, показанный на рис. 4.50:

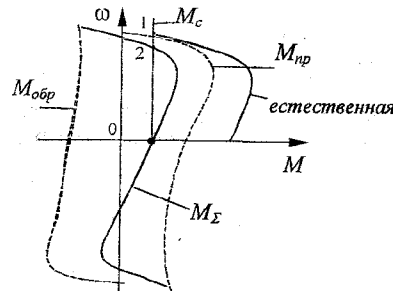


Рис. 4.50. Механические характеристики асинхронного двигателя при несимметрии питающего напряжения

Из графика видно, что включение двигателя на несимметричное напряжение приводит к значительному снижению максимального момента. При отсутствии добавочного сопротивления в цепи ротора скорость вращения двигателя изменяется незначительно (т.1 на естественной и т.2 - на искусственной характеристике), а работа в тормозном режиме практически невозможна. Этот режим используют для снижения пускового момента двигателя в электроприводах, имеющих кинематические передачи с люфтом (например, редуктор) во избежание большого удара на зубьях при пуске.

Введение в цепь ротора достаточно большого добавочного сопротивления позволяет получить характеристики, обеспечивающие надежный тормозной режим, пригодный для работы с малыми скоростями, например при спуске груза (рис. 4.51).

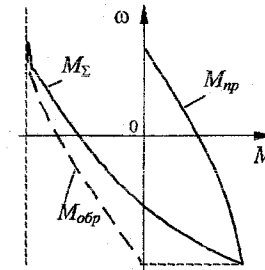


Рис. 4.51. Механическая характеристика асинхронного двигателя при несимметрии питающего напряжения при наличии добавочного сопротивления в цепи ротора

Существенными недостатками схем с несимметричным питанием при работе как в двигательном, так и тормозном режимах являются большие потери в меди и стали, ведущие к сильному нагреву.

Более качественные характеристики АД при несимметричном питании можно получить в режиме крайней несимметрии, который возникает при питании двигателя однофазным переменным током (отключение одной фазы). В этом случае обмотка статора создаст однофазное пульсирующее магнитное поле, которое также может быть разложено на два симметричных, вращающихся в противоположном направлении с синхронной скоростью. Каждое из этих полей будет создавать свой момент, а результирующий момент будет равен их алгебраической сумме. При этом амплитуды симметричных составляющих для напряжений прямой и обратной последовательности одинаковы и равны $U_n / \sqrt{3}$.

Характеристика результирующего момента в этом случае проходит через начало координат (рис. 4.52).

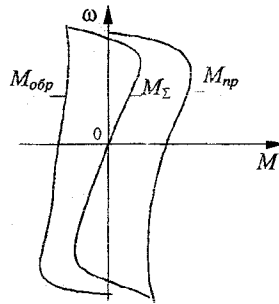


Рис. 4.52. Механическая характеристика асинхронного двигателя в режиме крайней несимметрии

В этом случае двигатель развивает только движущий момент при любом направлении вращения. При введении достаточно большого сопротивления $R_{доб}$ в цепь ротора, результирующая характеристика располагается во втором и четвертом квадрантах (рис. 4.53), и двигатель в данном случае обеспечивает работу в надежном тормозном режиме.

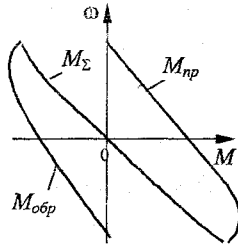


Рис. 4.53. Механическая характеристика асинхронного двигателя в режиме крайней несимметрии при наличии в цепи ротора добавочного сопротивления

Величина максимального тормозного момента в этом случае достигает соответствующего критического момента прямой или обратной последовательности и равна $\frac{1}{3} M_{кр.е}$ при трехфазном питании:

$$M_{кр.пр} = M_{кр.е} \left(\frac{U_n}{\sqrt{3}U_n} \right)^2 = \frac{1}{3} M_{кр.е}. \quad (4.86)$$

Потери в двигателе в режиме крайней несимметрии также значительно больше, чем при трехфазном питании из-за наличия обратно-синхронного поля и добавочного сопротивления в цепи ротора. Регулирование скорости возможно как в двигательном, так и в тормозном режиме только вниз от синхронной, а характеристики имеют меньшую жесткость, чем при регулировании изменением частоты питающего напряжения или числа пар

полусов, но большую, чем при реостатном регулировании. В связи с этим данный способ используют только в ЭП, работающих кратковременно на пониженной скорости.

4.5.2. Несимметрия сопротивлений в цепи ротора

Несимметричное включение добавочных сопротивлений в цепь ротора асинхронного двигателя применяют для увеличения числа пусковых характеристик, получаемых при ограниченном числе сопротивлений.

Реализуют этот режим с помощью несимметричного контроллера, обеспечивающего при каждом его положении выведение сопротивления только в одной фазе. Благодаря этому при заданном числе ступеней сопротивлений удается получить почти в три раза большее количество механических характеристик, чем в случае симметричных сопротивлений.

Например, если схема включения АД с симметричным сопротивлением при симметричном выведении сопротивлений позволяет получить только три рабочие характеристики (рис. 4.54, а,б,в).

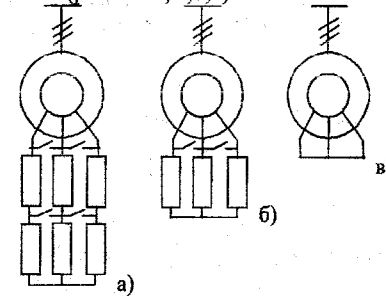


Рис. 4.54. Этапы выведения сопротивления в цепи ротора с помощью симметричного контроллера

то при несимметричном выведении ступеней реостата можно получить уже пять механических характеристик (рис.4.55):.

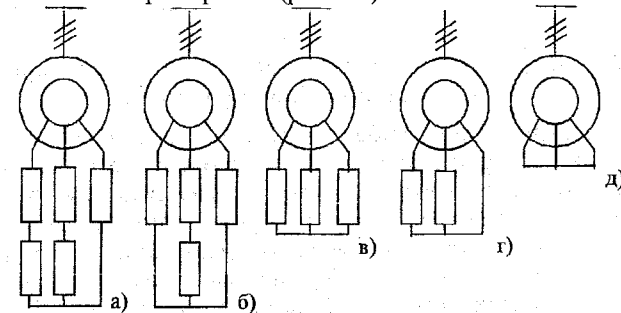


Рис. 4.55. Этапы выведения сопротивления в цепи ротора с помощью несимметричного контроллера

Однако, в некоторых случаях несимметричное включение сопротивлений может оказать крайне неблагоприятное влияние на вид механических характеристик.

Рассмотрим влияние несимметрии цепи ротора на работу двигателя при включении ротора АД в "звезду".

При симметричном напряжении сети в статоре протекают токи имеющие частоту сети. Так как сопротивления фаз ротора неодинаковы, фазные токи в цепи ротора также будут неодинаковыми, т.е. вновь имеем случай с несимметричной системой, но уже токов ротора. Эту систему можно разложить на симметричные составляющие прямой и обратной последовательности (токов нулевой последовательности не будет, так как нет нулевого провода).

При этом частота токов ротора прямой и обратной последовательности одинакова и может быть определена как

$$f_{2a} = f_{2e} = f_{2c} = f_1 s.$$

Токи прямой последовательности (рис.4.56) создают м.д.с. и соответствующее поле, вращающееся относительно ротора со скоростью

$$\omega_{(np)/p,np} = \omega_0 s,$$

а относительно статора

$$\omega_{(np)/c,np} = \omega_p + \omega_{(np)/p,np} = \omega_0 (1 - s) + \omega_0 s = \omega_0.$$

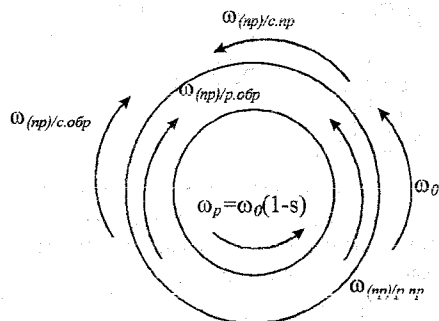


Рис. 4.56. Картина м.д.с. в асинхронном двигателе при несимметричных сопротивлениях обмоток ротора

Таким образом, поле ротора, создаваемое токами ротора прямой последовательности, вращается с той же скоростью, что и поле статора. Другими словами оно неподвижно относительно поля статора. А это означает, что взаимодействие потока со стороны статора с токами ротора прямой последовательности приводит к созданию прямого вращающего момента M_{np} , соответствующего моменту двигателя в обычной схеме включения при симметричных сопротивлениях в цепи ротора. Этот момент, независимо от скольжения, всегда положителен и является функцией скольжения.

Токи обратной последовательности создают обратную м.д.с. и соответствующее обратное поле, скорость вращения которого относительно ротора

$$\omega_{(np)/p,обр} = -\omega_0 s$$

а относительно статора

$$\omega_{(np)/c,обр} = \omega_0 (1 - s) - \omega_0 s = \omega_0 (1 - 2s). \quad (4.86)$$

Таким образом, величина и направление вращения поля ротора, создаваемого токами ротора обратной последовательности, зависит от скольжения.

Так, при $0 < s < 0.5$, как видно из формулы (4.86), это поле вращается в том же направлении, что и поле статора, но с частотой $\omega_0(1-2s)$. Благодаря этому в обмотке статора индуцируется э.д.с., частота которой $f_{об} = f_c (1-2s)$ и соответственно возникают токи статора этой же частоты.

Взаимодействие результирующего потока от м.д.с. статора и обратной м.д.с. ротора с током статора соответствующей частоты приводит к возникновению обратного вращающего момента $M_{обр}$. Чтобы понять характер $M_{обр}$, достаточно представить, что токи ротора обратной последовательности создаются как бы за счет питания двигателя со стороны колец ротора от некоего фиктивного источника энергии частотой $s f_1$. В этом случае при $0 < s < 0.5$, если считать ротор неподвижным, момент, создаваемый потоком обратного направления и током статора, будет отрицательным.

При $s = 0.5$ скорость вращения обратного поля ротора относительно статора равна

$$\omega_{(np)/c,обр} = \omega_0 (1 - 2s) = 0.$$

Таким образом, в статоре не создается э.д.с. обратной частоты, токи этой частоты в статоре отсутствуют, а следовательно, момент $M_{обр}$ при $s = 0.5$ будет равен нулю.

При $0.5 < s < 1$ знак момента изменится на противоположный, т.к. теперь направление вращения поля относительно статора, создаваемого токами обратной последовательности, будет противоположным по отношению к направлению вращения основного поля, т.е. поля тока статора обратной последовательности и поле ротора совпадает по знаку ($M_{обр} > 0$).

Результирующий момент на валу двигателя, равный $M_{np} + M_{обр}$, в функции скольжения представляет собой уже более сложную кривую, имеющую при скольжении, близком к 0.5 "провал", что при достаточно большом моменте нагрузки на валу может вызвать прекращение разгона двигателя и застревание на скорости близкой к $0.5\omega_0$.

Механическая характеристика асинхронного двигателя в режиме роторной несимметрии приведена на рис. 4.57.

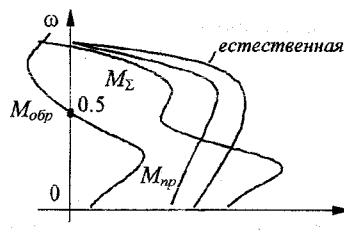


Рис. 4.57. Механические характеристики асинхронного двигателя при несимметрии сопротивлений в цепи ротора

Чем больше сопротивление цепи ротора, тем "провал" меньше. Поэтому для уменьшения несимметрии токов в роторе, как правило, на последней ступени регулирования, отключают не одну секцию, а две (в двух фазах). В целом, чем больше ступеней регулирования (т.е. чем меньше разница сопротивлений фаз при выведении одной из ступеней), тем меньше по величине эти "провалы". Помимо "провала", кривая момента, имеет еще ряд особенностей, ограничивающих работу АД с несимметричными сопротивлениями в цепи ротора. К ним следует отнести взаимодействие между током и потоком прямой и обратной последовательности, которое приводит к возникновению пульсирующих моментов. Так как их среднее значение равно нулю, то они не влияют на вид механических характеристик, однако вследствие больших пульсаций момента, ограничивают допустимую несимметрию. Кроме того, наличие потоков и токов обратной последовательности увеличивает потери в меди и потери в стали, что приводит к чрезмерному нагреву двигателя особенно велики потери в меди и стали при малых скольжениях, так как двигателю приходится преодолевать как момент нагрузки, так и обратный момент двигателя, а это приводит к увеличению тока ротора и соответственно потерь.

Режим работы АД при несимметрии сопротивлений в роторной цепи используют для получения большего числа регулировочных характеристик при меньшем числе ступеней реостата. Этот режим может возникнуть как аварийный, например, при перегорании сопротивления в роторной обмотке.

Аналогичный режим может возникнуть в синхронном двигателе при пуске (так как обмотка ротора в данном случае может рассматриваться как трехфазная с оборванной фазой). Во избежание застревания синхронного двигателя при пуске в обмотку возбуждения вводят добавочное сопротивление.

4.6. Особенности работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Среди асинхронных двигателей двигатели с короткозамкнутым ротором (АД с к.з. ротором) являются преобладающими и нашли широкое

применение во многих отраслях промышленности и в быту: в доменных цехах (на погрузочных ЭП, в клапанах воздухонагревателя), в подъемных устройствах (тельферы, кран-балки, тихоходные мостовые краны), станочных ЭП, бытовых электроустановках и приборах. Кроме того, они просто в малоомощных ЭП транспортеров, вентиляторов и насосов незаменимы.

В настоящее время АД с к.з. ротором различного конструктивного исполнения выпускаются промышленностью в самых в общем диапазоне мощностей от (0,01 кВт - в асинхронных микродвигателях) до 3,5 тыс. кВт и выше.

Основные промышленные серии АД с к.з. ротором:

- краново-металлургические (МТК) - до 30 кВт;
- с повышенным скольжением (АС) - до 100 кВт;
- с повышенным пусковым моментом (АП) - до 100 кВт;
- с ротором номинального исполнения (А,4А) - до 100 кВт;
- с двойной клеткой ротора (ДАМСО)- 140..1250 кВт;
- с глубоким пазом (ГАМ).

Их пусковые показатели приведены в таблице:

Показатели	Род ротора и тип электродвигателя					
	А, 4А	ГАМ	ДАМСО	АС	АП	МТК
Мп / Мн	0,5-1,2	1,0-1,5	1,0-2,0	2,0-2,1	1,8	до 3,0
Ип / Ин	5,5-6,0	4,2-5,0	3,0-5,5	4,0	6,0	4,4

Двигатели серии А - общепромышленного применения. Обмотка ротора с глубоким пазом, выполнена литьем из алюминиевого сплава. Имеют самый низкий критический пусковой момент, большой пусковой ток и применяются для ЭП длительного режима, не требующих больших пусковых моментов (станки, вентиляторы, насосы и т. д.).

Двигатели серии АП - с повышенным пусковым моментом - изготавливают до 100 кВт, 500 В. Роторы двигателей малой мощности имеют глубокие пазы, а большой - двойную клетку. Имеют большой пусковой и критический моменты, самый большой пусковой ток, и самое малое скольжение. Применяют в ЭП длительного режима работы для механизмов, которые обладают большим статическим моментом трогания (дробилки, мельницы и т. д.).

Двигатели серии АС - с повышенным скольжением. Изготавливают до 100 кВт, 500 В. Ротор имеет менее глубокий паз, чем в двигателях серии А. Обмотка - из алюминиевого сплава повышенного сопротивления, заливаемого в пазы под давлением. Имеют еще больший пусковой момент, меньший пусковой ток и большое номинальное скольжение (от 0,1 - 0,16). Применяют в ЭП кратковременного режима, с ударной нагрузкой (молоты, прессы и т.д.).

Двигатели серии МТК - краново-металлургические. Рассчитаны для работы в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками. Имеют повышенный пусковой момент и сравнительно небольшой пусковой ток (за счет увеличенного сопротивления стержней ротора). Повышенное скольжение для этих двигателей (0,03-0,11) не является существенным недостатком, т.к. они не предназначены для длительного режима работы. Роторная обмотка - из латунных стержней.

Двигатели серии ДАМСО - с двойной клеткой ротора (до 1250 кВт и выше) на 3000 и 6000 вольт. Эти двигатели имеют почти такие же кратности пускового и критического моментов, пускового тока, номинального скольжения, как и двигатели серии А. Эти двигатели продолжают серию А и предназначены для длительного режима работы.

Сравнительные механические и скоростные характеристики асинхронных двигателей с к.з. ротором приведены на рис. 4.58.

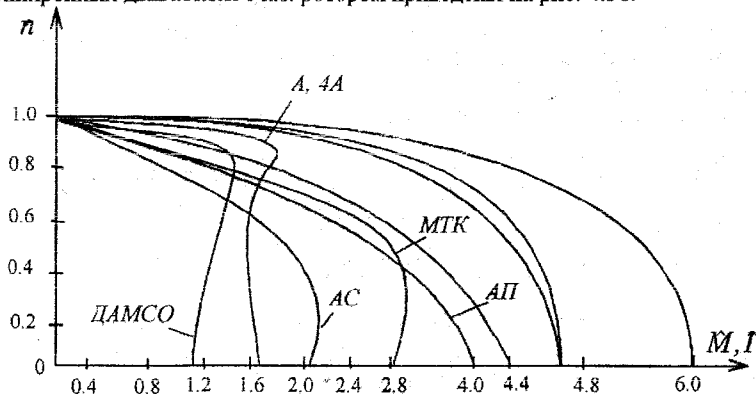


Рис. 4.58. Механические характеристики АД с короткозамкнутым ротором различных серий

Прежде, чем перейти к рассмотрению механических свойств и особенностей АД с короткозамкнутым ротором, следует вспомнить особенности их конструкции, которые, в основном, и определяют эти свойства. Если обмотка статора у АД с короткозамкнутым ротором ничем не отличается от обмотки статора АД с фазным ротором, то обмотка ротора выполняется в виде жестких стержней из алюминия или меди, концы которых припаяны к короткозамкнутым концам (т.н. "беличья клетка"). Кроме того, у АД с короткозамкнутым ротором отсутствуют контактные кольца, позволяющие изменять сопротивление цепи ротора.

Благодаря своей конструкции, АД с короткозамкнутым ротором имеют сравнительно небольшое сопротивление R_2 , а, следовательно, при одной и той же мощности и числе полюсов они обычно имеют меньшее номинальное и критическое скольжение (с ростом мощности эти параметры становятся

уменьшаются). Но самой главной, особенностью АД с короткозамкнутым ротором является то, что величина R_2 сильно изменяется в зависимости от величины скольжения (т.е. при различных скоростях) вследствие явления вытеснения тока на поверхность проводника. Поэтому полученные ранее зависимости, описывающие механические и электромеханические свойства АД с фазным ротором оказываются непригодными для расчетов характеристик АД с к.з. ротором.

Так как эффект вытеснения тока проявляется наиболее сильно при больших скольжениях, то использовать зависимости, описывающие механические характеристики АД с фазным ротором, для АД с короткозамкнутым ротором можно без большой погрешности только при малых скольжениях (меньше $\pm S_{кр}$). Для расчета характеристик в полном диапазоне следует пользоваться экспериментальными кривыми, приводимыми в технической документации на двигатель заводом-изготовителем.

Особо следует остановиться на пусковых свойствах АД с короткозамкнутым ротором. Пусковой момент для АД с короткозамкнутым ротором является характерным и важным эксплуатационным параметром. Относительное значение пускового момента к номинальному является характерным параметром ($M_n/M_N=0.8-2.0$), причем, чем тихоходней двигатель, тем меньше M_n/M_N . У асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором эта величина не всегда является наименьшим значением в области двигательного режима, т.к. действительная характеристика в области скольжений, близких к единице, отличается от теоретической. Причиной того являются дополнительные моменты, обусловленные высшими гармоническими, эффектом вытеснения тока в пазах, которые не учтены в теоретических зависимостях для механической характеристики. Поэтому в действительной характеристике (рис. 4.59) иногда имеет место "провал" (кривая 1 - действительная характеристика; кривая 2 - теоретическая).

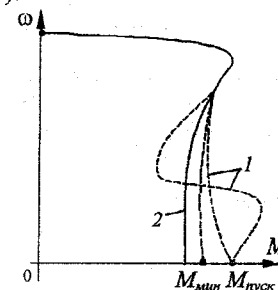


Рис. 4.59. Пусковая механическая характеристика АД с короткозамкнутым ротором

В случае, когда момент сопротивления при пуске велик, а провал достаточно глубок, это может вызвать «застывание» двигателя на малой скорости. Кроме того, при работе на пониженной скорости может возникнуть недопустимый перегрев обмоток, что приведет к выходу двигателя из строя.

Второй важной величиной для АД с короткозамкнутым ротором является пусковой ток. Кратность пускового тока ($I_n/I_n = \lambda_i = 4-7$) увеличивается с увеличением номинальной мощности двигателя и пропорционально номинальной скорости.

Таким образом, как видим, АД с короткозамкнутым ротором нормального исполнения обладает явно неудовлетворительными пусковыми параметрами. И если улучшить пусковые свойства (т.е. увеличить M_n и снизить I_{2n}) для АД с фазным ротором можно за счет увеличения активного сопротивления цепи ротора (введением $R_{2доп}$), то для АД с короткозамкнутым ротором этот способ неприменим, т. к. внешнее сопротивление ввести в данном случае невозможно, а увеличение внутреннего сопротивления вызвало бы увеличение скольжения на рабочей части и снижение КПД. Улучшение пусковых свойств АД с короткозамкнутым ротором достигается применением специальных конструкций обмоток ротора, например, с глубокими и узкими пазами и узкими высокими стержнями, или в виде двойной «беличьей клетки». При этом вследствие явления поверхностного эффекта активное сопротивление ротора этих двигателей растет с увеличением скольжения, что приводит к увеличению значения момента и подъему ветви механической характеристики (рис. 4.60).

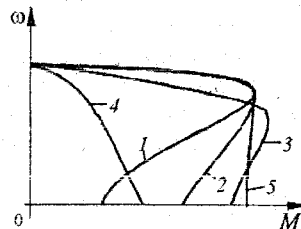


Рис. 4.60. Пусковые характеристики АД с короткозамкнутым ротором специальных конструкций: 1 - ротор с обыкновенными круглыми пазами; 2 - ротор с глубокими пазами; 3 - ротор с двойной клеткой; 4 - ротор с массивным стальным ротором

Так, например, повышение пускового момента АД с короткозамкнутым ротором с глубокими пазами, как показано на рис. 4.61, происходит потому, что при пуске, когда частота тока ротора близка к частоте сети, э.д.с. самоиндукции, наводимая магнитным потоком рассеяния, а, следовательно, и индукционное сопротивление провода в нижней части паза, оказывается значительно большим, чем в верхней. Поэтому большая часть пускового тока

будет проходить по верхней части проводника. Общее смещение последнего будет использоваться не полностью и это приведет к увеличению активного сопротивления, а, следовательно, и пускового момента двигателя.

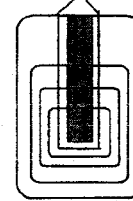


Рис. 4.61. Картина потока в глубоком пазу

По мере разгона двигателя частота тока ротора снижается и ток распространяется по всему сечению обмотки.

Еще более распространенной конструкцией, позволяющей улучшить пусковые свойства АД с короткозамкнутым ротором, являются двигатели с двойной клеткой (рис. 4.62, а), у которых одна обмотка (пусковая) имеет меньшее сечение и, следовательно, большее сопротивление и меньшую индуктивность по сравнению с нижней (рабочей) обмоткой. При пуске индуктивное сопротивление рабочей обмотки гораздо выше и ток проходит через пусковую обмотку, а по мере разгона с уменьшением частоты тока ротора, индуктивное сопротивление ее снижается, и ток распределяется между двумя обмотками равномерно. Так как сечение рабочей обмотки больше, т. е. ее сопротивление меньше, то практически весь ток при малых скольжениях проходит через нее.

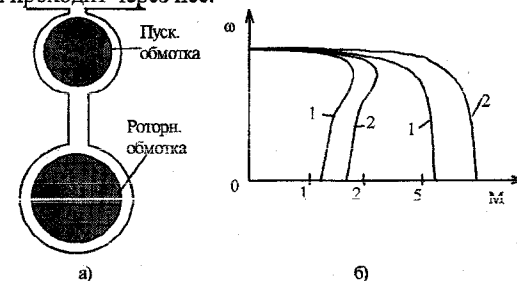


Рис. 4.62. Конструкция ротора с двойной клеткой (а) и вид пусковых механических характеристик при использовании различных конструкций ротора (б)

В целом, качество АД с короткозамкнутым ротором, на порядок лучше, чем АД с фазным ротором, поэтому в скором будущем современные способы регулирования скорости и возможности пуска полностью позволят вытеснить АД с фазным ротором как менее надежные и менее экономичные в эксплуатации.

4.6.1. Расчет механических характеристик АД с короткозамкнутым ротором

В связи с тем, что сопротивление цепи АД с короткозамкнутым ротором изменяется в достаточно широких пределах, расчет механической характеристики этого двигателя при использовании общей формулы для электромагнитного момента (4.25) не дает достаточно точных результатов. К тому же, параметры ($R_1; R'_2; X_K$), входящие в эту формулу, в каталогах, как правило, не приводятся. Обычно для АД с короткозамкнутым ротором в паспортных данных указываются: $P_H, n_H, \hat{M}_{KP} = \frac{M_{KP}}{M_H}$ и $\hat{I}_H = \frac{I_H}{I_n}$, $\hat{M}_{пуск} = \frac{M_{пуск}}{M_H}$, (иногда также указываются $\cos \phi_n, \cos \phi_H$). В этом случае для расчета механической характеристики двигателя в полном диапазоне изменения скольжения пользуются уточненной формулой Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{KP} \cdot (1 + a \cdot S_{KP})}{\frac{S}{S_{KP}} + \frac{S_{KP}}{S} + 2 \cdot a \cdot S_{KP}} = \frac{M_{KP} \cdot (2 + q)}{\frac{S}{S_{KP}} + \frac{S_{KP}}{S} + q}, \quad (4.87)$$

где

$$a = \frac{R_1}{R'_2}, \quad (4.88)$$

$$q = 2 \cdot \frac{R_1}{R'_2} \cdot S_{KP}. \quad (4.89)$$

Последовательность расчета

Определяют номинальное скольжение:

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0},$$

где ω_0 - синхронная частота вращения (рад/с); $\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30}$ - номинальная частота вращения (рад/сек);

Определяют S_{KP} и q . Эти величины могут быть ориентировочно рассчитаны при подстановке в уравнение (4.87) координат двух известных точек характеристики, соответствующих номинальному режиму и пуску

$$\left. \begin{aligned} \frac{M_H}{M_{KP}} &= \frac{2 + q}{\frac{S_H}{S_{KP}} + \frac{S_{KP}}{S_H} + q} \\ \frac{M_n}{M_{KP}} &= \frac{2 + q}{\frac{I}{S_{KP}} + S_{KP} + q} \end{aligned} \right\}$$

$$S_{KP} = \frac{S_H + \sqrt{S_H \cdot A}}{1 + \sqrt{S_H \cdot A}}; \quad (4.90)$$

$$q = \frac{\frac{1}{S_{KP}} + S_{KP} - 2 \cdot \frac{M_K}{M_n}}{\frac{M_K}{M_n} - 1}, \quad (4.91)$$

$$\text{где } A = \frac{\frac{M_{KP}}{M_H} - 1}{\frac{M_{KP}}{M_n} - 1}.$$

Если же R_1, R'_2, X_K известны, то значения S_{KP} и q могут быть рассчитаны по известным формулам:

$$S_{KP} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}; \quad (4.92)$$

$$q = 2 \cdot \frac{R_1}{R'_2} \cdot S_{KP}. \quad (4.93)$$

При отсутствии заводских данных параметры R_1, R'_2, X_K можно определить следующим образом. Для случая, когда обмотки двигателя соединены в "звезду" пусковой момент на естественной характеристике может быть определен по формуле (4.29). С другой стороны, полное сопротивление двигателя при пуске

$$Z_K^2 = (R_1 + R'_2)^2 + X_K^2, \quad (4.94)$$

где

$$Z_K = \frac{U_{1\phi}}{I_{пуск}}. \quad (4.95)$$

Из (4.93), (4.94), (4.95) выразим R'_2 :

$$R'_2 = \frac{\omega_0}{m \cdot U_{1\phi}} \cdot M_{пуск} \cdot Z_K^2, \quad (4.96)$$

где $M_{пуск}$ и $I_{пуск}$ - берутся из каталога.

Из выражения (4.93) следует, что

$$(R_1 + R'_2) = Z_K \cdot \cos \phi_{пуск}, \quad (4.97)$$

где $\cos \phi_{пуск}$ - коэффициент мощности при пуске двигателя (т.е. при $S = 1$).

Этот коэффициент может быть подсчитан по формуле:

$$\cos \phi_{пуск} = \cos \phi_H \left[\frac{\hat{M}_n}{\hat{I}_n} \cdot \frac{\eta_H}{1 - S_H} + \hat{I}_n \cdot \gamma \cdot (1 - \eta_H) \right], \quad (4.98)$$

где $\gamma = \frac{\Delta P_{м.с.н.}}{\Delta P_H}$ - отношение потерь в меди статора при номинальной нагрузке к полным потерям при номинальной нагрузке (при отсутствии этих данных можно с достаточной точностью принимать $\gamma = 0,35$).

Тогда активное сопротивление фазы статора

$$R_1 = Z_K \cdot \cos \varphi_n - R'_2, \quad (4.99)$$

а реактивное сопротивление при пуске

$$X_K = Z_K \cdot \sin \varphi_n. \quad (4.100)$$

Таким образом, определив R_1, R'_2, X_K , определяют $S_{кр}$ и q , а затем по уточненной формуле Клосса рассчитывается полная характеристика двигателя, причем, это уравнение справедливо не только для двигательного режима, но и для режима противовключения ($S > 1$) и рекуперативного торможения ($S < 0$). При этом значения $|q|$ и $|S_{кр}|$ неизменны для всех режимов, а $M_{кр}$ для генераторного режима несложно установить, подставив в формулу Клосса $S = S_{кр.д} = -S_{кр}$:

$$\frac{M_{кр.д}}{M_{кр.дв.}} = \frac{2+q}{\frac{-S_{кр}}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{-S_{кр}} + q} = -\frac{2+q}{2-q};$$

$$M_{кр.д} = M_{кр.дв.} \cdot \left(-\frac{2+q}{2-q}\right). \quad (4.101)$$

4.7. Характеристики и механические свойства синхронного двигателя

Синхронные двигатели (СД) применяют, главным образом, для электроприводов средних и больших мощностей (около сотен и тысяч кВт). Преимуществом СД является возможность работы в режиме компенсации реактивной мощности (с опережающим cosφ) потребляемой другими электроприемниками цеха или предприятия из сети. Это качество в ряде случаев оправдывает применение более дорогих, по сравнению с АД, СД.

В промышленности СД широко применяется как в нерегулируемом (насосы, компрессоры и др.), так и в регулируемом (воздуходувки, мощные турбомеханизмы) ЭП, в системе вентильного двигателя.

Схема включения СД приведена на рис. 4.63.

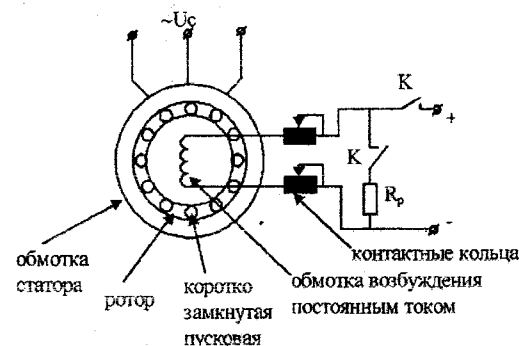


Рис. 4.63. Схема включения синхронного двигателя (R_p - разрядное сопротивление)

4.7.1. Механические характеристики синхронного двигателя в двигательном режиме

Из курса "Электрические машины" известно, что процессу пуска и рабочему режиму соответствуют различные механические характеристики. В соответствии с принципом работы СД его механическая характеристика представляет абсолютно жесткую характеристику (рис. 4.64).

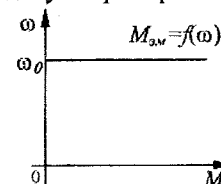


Рис. 4.64. Механическая характеристика синхронного двигателя

т.е. скорость вращения равна

$$\omega = \omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_c}{p}. \quad (4.102)$$

Жесткость характеристики СД $\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \infty$.

Однако СД работает устойчиво лишь в определенном интервале изменения значений момента на валу, так как с изменением нагрузки изменяется положение осей магнитных полей статора и ротора, которое характеризуется углом θ сдвига фаз между векторами напряжения сети и э.д.с., наводимой полем ротора в обмотке статора.

Зависимость между моментом на валу двигателя и углом θ является характеристикой, устанавливающей область его устойчивой работы и перегрузочную способность и называется угловой характеристикой.

Для установления этой зависимости целесообразно воспользоваться упрощенной векторной диаграммой СД, приведенной на рис. 4.65.

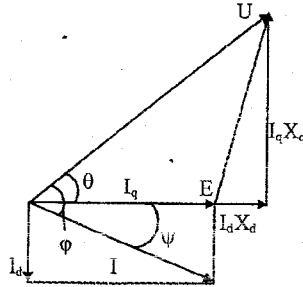


Рис. 4.65. Векторная диаграмма синхронного двигателя

Обозначения на диаграмме: x_d, x_q - индуктивное сопротивление по продольной и поперечной оси; I_d, I_q - составляющие тока по продольной и поперечной осям; I - ток двигателя; U - напряжение сети; E - э.д.с., индуцированная в обмотке статора.

Пренебрегая падением напряжения на активном сопротивлении в статоре можно считать, что активная электромагнитная мощность равна сетевой:

$$P_{эм} \cong P_c = 3U_c I_l \cos \varphi,$$

а электромагнитный момент равен

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_0}.$$

Из векторной диаграммы видно, что:

$$U \cos \theta = E + I_d x_d;$$

$$U \sin \theta = I_q x_q;$$

$$\varphi = \theta + \psi.$$

Таким образом

$$P_{эм} = 3UI \cos(\psi + \theta), \quad (4.103)$$

а при условии, что

$$\cos(\psi + \theta) = \cos \psi \cos \theta - \sin \psi \sin \theta;$$

$$I \cos \psi = I_q;$$

$$I \sin \psi = I_d,$$

после преобразований, окончательно получим

$$P_{эм} = M_{эм} \omega_0 = 3 \left[\frac{UE \sin \theta}{x_d} + \frac{U^2 \sin 2\theta}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \right]. \quad (4.104)$$

Откуда электромагнитный момент СД:

$$M_{эм} = \frac{3}{\omega_0} \left[\frac{UE \sin \theta}{x_d} + \frac{U^2 \sin 2\theta}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \right], \quad (4.105)$$

где

$$\frac{3EU \sin \theta}{\omega_0 x_d} = M_{синхр} - \text{синхронный момент};$$

$$\frac{3U^2 \sin 2\theta}{2\omega_0} \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right] = M_{реакт} - \text{реактивный момент}.$$

Для неявнополюсных синхронных машин с малым насыщением $x_d = x_q$ и, следовательно, $M_{реакт} = 0$. У явнополюсных СД, в результате различной магнитной проводимости по продольной и поперечной оси, $x_d \neq x_q$, вследствие чего и возникает $M_{реакт}$.

Из уравнения (4.105) видно, что синхронный момент является гармонической функцией угла θ , а реактивный момент при изменении угла θ изменяется с двойной частотой, причем реактивная составляющая момента составляет (25 ÷ 30)% от $M_{синхр}$.

Таким образом, если представить угловую характеристику синхронного двигателя в виде графика (рис. 4.66), то несложно видеть, что максимум момента $M_{эм}$ в явнополюсной машине имеет место при угле $\theta < 90^\circ$, а у неявнополюсной - при угле $\theta = 90^\circ$ ($\sin \theta = 1$):

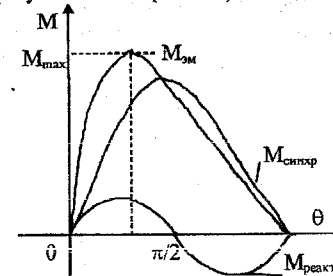


Рис. 4.66. Угловая характеристика синхронного двигателя

Перегрузочная способность явнополюсных машин несколько ниже, чем неявнополюсных:

$$\frac{M_{max}}{M_{ном}} = \lambda = \frac{\sin \theta_{max}}{\sin \theta_{(при M_c = M_H)}}, \quad (4.106)$$

а с учетом толчков нагрузки обычно угол θ , соответствующий номинальному режиму работы, принимают меньше $\theta_{н.реж} \approx 20 \div 30^\circ$.

Тогда

$$\lambda_M = \frac{\sin 90}{\sin(20 \div 30)} \approx 2 \div 3$$

Пропорциональность между $M_{синх}$ и U делает двигатель более устойчивым и к колебаниям питающего напряжения (по сравнению с АД, где $M \sim U^2$)

Так как в синхронном двигателе $M_{эм} \sim E$, то перегрузочная способность двигателя может быть увеличена за счет форсировки тока возбуждения при толчках нагрузки, что реализуют в замкнутых системах электропривода. В результате даже при достаточно больших колебаниях нагрузки сохраняется устойчивая работа СД. Этот метод также используется при провалах напряжения в сети. В противном случае, как известно, увеличение нагрузки на валу СД приведет к увеличению тока I и соответственно к увеличению угла θ , и если угол θ превзойдет значение, соответствующее максимальному моменту двигателя, то последний начнет уменьшаться, станет меньше M_c , в результате чего произойдет выпадение двигателя из синхронизма.

4.7.2. Регулирование скорости синхронного двигателя

Как видно из выражения для синхронной скорости, регулирование скорости теоретически возможно либо за счет изменения частоты питающего напряжения, либо за счет изменения числа пар полюсов. Второй метод, как правило, на практике не используют ввиду сложности конструкции и высокой стоимости. Кроме того, это возможно только для СД с неявнополюсным ротором, т.к. необходимо переключать полюса одновременно у статора и ротора.

Регулирование скорости изменением частоты питающего напряжения является весьма перспективным способом и в настоящее время реализовано в системах частотно-регулируемого синхронного ЭП с применением преобразователей частоты. Эти системы получили название "Вентильный двигатель" (рис. 4.67).

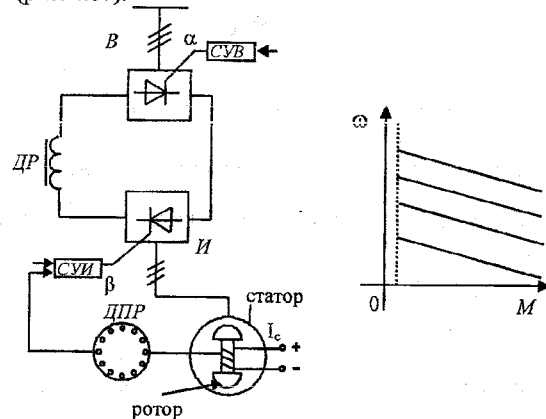


Рис. 4.67. Регулирование скорости вращения СД в системе Вентильный двигатель и вид его характеристик

На рис.4.67. обозначены: В - выпрямитель; И - инвертор; СУИ, СУВ - системы управления инвертором и выпрямителем; ДПР - датчик положения ротора.

С помощью выпрямителя изменяется напряжение на инверторе. Датчик положения ротора образует обратную связь по углу, которая обеспечивает включение вентилей инвертора в строгом соответствии с углом поворота ротора. Этим обеспечивается регулирование скорости с соблюдением соотношения $\frac{U}{f} = const$.

4.7.3. Тормозные режимы работы синхронного двигателя

Работа синхронных двигателей возможна в двух тормозных режимах:

- режим рекуперативного торможения;
- режим динамического торможения.

Режим рекуперативного торможения возможен, когда к валу двигателя приложен движущий момент со стороны рабочей машины, направленный в сторону движения поля статора. При этом ротор вращается со скоростью $\omega = \omega_0$, но происходит изменение угла θ ($\cos \theta < 0$), и электромагнитный момент становится тормозным. Установившийся режим при рекуперативном торможении наступает при $M_{эмторм} = M_c$. Механическая характеристика имеет вид, представленный на рис. 4.68.

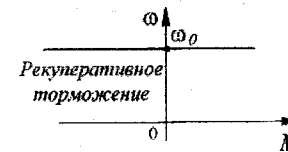


Рис. 4.68. Механическая характеристика СД в режиме рекуперативного торможения

При динамическом торможении обмотка статора отключается от сети и замыкается на $R_{доб}$. СД остается в возбужденном состоянии. В этом случае режим работы СД аналогичен соответствующему режиму для АД при независимом возбуждении обмотки статора АД. Их отличие состоит в том, что постоянное магнитное поле наводится со стороны ротора (от обмотки возбуждения, или, в явнополюсной машине - от полюсов вращающегося ротора). При вращении этого поля последнее пересекает витки статорной обмотки и наводит в ней э.д.с. переменного тока с частотой, зависящей от скорости вращения ротора, в результате чего возникает тормозной $M_{эм}$. Характеристики в данном случае имеют такой же вид, как и у АД в режиме динамического торможения (рис. 4.69).

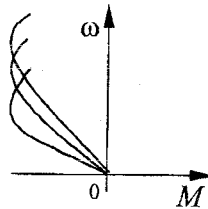


Рис. 4.69. Механические характеристики СД в режиме динамического торможения

Режим *противовключения* может быть реализован только при переводе СД в асинхронный режим. При этом ОВ отключается и двигатель работает как обычный короткозамкнутый АД, однако токи в роторе значительно возрастают, вызывая перегрев двигателя, а также к ухудшению магнитных свойств роторной обмотки. По этим причинам такой режим на практике не используют.

4.7.4. Способы пуска синхронного двигателя

Асинхронный пуск синхронного двигателя

Особого внимания заслуживает режим пуска СД, который в синхронном ЭП, как правило, осуществляется, как и пуск обычных короткозамкнутых АД. С этой целью на роторе имеется пусковая (демпферная) обмотка в виде беличьей клетки (рис 4.63). Но в отличие от АД пусковая обмотка СД не рассчитана на длительную работу в асинхронном режиме.

На период пуска обмотка возбуждения СД отключается от источника постоянного тока и замыкается на добавочное сопротивление $R_{доб}(8+10R_{об}=R_{доб})$. При этом по ОВ будет протекать однофазный переменный ток, обусловленный появлением э.д.с. самоиндукции в ОВ, наводимой полем статора СД. Частота этого тока зависит от скорости вращения ротора и отличается от частоты поля статора. Вследствие этого ток в обмотке возбуждения создает свое магнитное поле и соответствующую э.д.с. в обмотке статора (соответственно и дополнительные токи этой частоты). Таким образом, режим асинхронного пуска СД можно рассматривать как режим с несимметрией в роторной цепи АД. Реальная характеристика (4) для рассмотренного способа пуска СД формируется из нескольких составляющих и приведена на рис. 4.70.

Уменьшение "провала" на результирующей характеристике, который может привести к застреванию двигателя при пуске, достигается введением добавочного сопротивления $R_{доб}$.

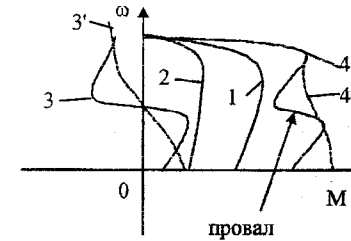


Рис. 4.70. Формирование пусковой характеристики СД при асинхронном пуске: 1 - от пусковой обмотки; 2,3 - от поля обмотки возбуждения (2 - от прямого поля ОВ, 3 - от обратного поля ОВ); 4 - результирующая пусковая характеристика

Пусковые характеристики при асинхронном пуске имеют такой же вид, как и характеристики асинхронного двигателя и приведены на рис. 4.71.

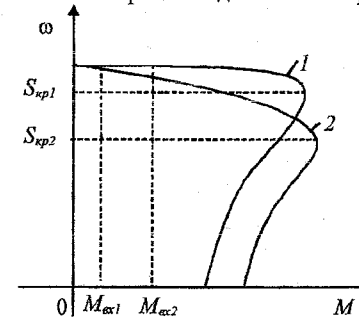


Рис. 4.71. Пусковые характеристики СД при асинхронном пуске

При выходе на подсинхронную скорость $(95+98\%)\omega_0$, двигатель переводят в обычный режим возбуждения: контакт К - размыкают, контакт Л-замыкают. Момент $M_{сх}$ называют моментом вхождения в синхронизм.

Как видно из характеристик, при меньшем пусковом моменте характеристика 1, которой соответствует $S_{кр1} < S_{кр2}$ (т.е. $R_{рот}$ в первом случае меньше чем $R_{рот}$ во втором), момент вхождения в синхронизм оказывается большим, чем для характеристики 2, имеющей больший пусковой момент. Это свойство используют применительно к различному характеру изменения $M_{нагр}$. Так, например, для вентиляторной нагрузки, имеющей нелинейно-возрастающий характер M_c , целесообразно использовать характеристику 1, как показано на рис. 4.72.

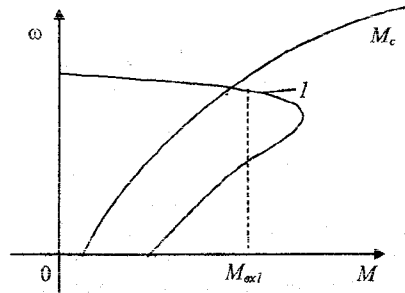


Рис. 4.72. Асинхронный пуск СД с вентиляторной нагрузкой на валу

Запуск СД с использованием тиристорных регуляторов в цепи статора

Схема для запуска СД этим способом приведена на рис. 4.73:

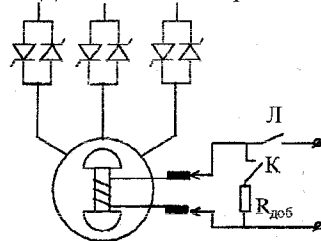


Рис. 4.73. Запуск СД с использованием тиристорного регулятора

На начало пуска контакт К замкнут (контакт Л разомкнут) на внешнее сопротивление, а напряжение на статоре $U_{ст} = U_{min}$.

В результате изменения угла управления α напряжение $U_{ст}$, подводимое к статору возрастает, и СД плавно разгоняется в асинхронном режиме при регулировании напряжения.

К достоинствам этого способа можно отнести: меньшие пусковые токи; отсутствие ударных моментов; возможность управляемого по времени запуска для тех рабочих машин, где это необходимо (например, турбокомпрессоров).

Недостатком его является то, что - энергия скольжения выделяется в роторных цепях и может привести к перегреву узлов машины. Поэтому пуск от регуляторов напряжения должен осуществляться в системах имеющих контроль тепловыделения в роторе.

Запуск от специального пускового устройства

На рис. 4.74 приведен один из способов запуска СД в системе Г-Д с помощью специального пускового устройства.

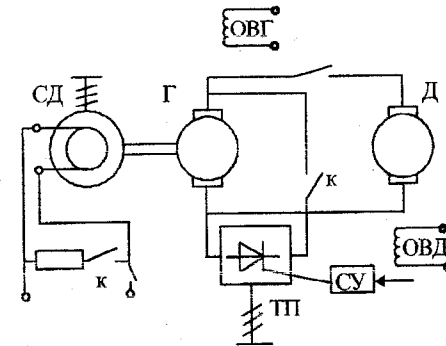


Рис. 4.74. Запуск СД от специального пускового устройства

Запуск СД осуществляется следующим образом. При отключенном от сети СД с замкнутой на разрядное сопротивление обмоткой возбуждения, он раскручивается при помощи МПТ, которая получает питание от отдельного источника (например, тиристорного преобразователя). При достижении подсинхронной скорости $\omega_{сд} = \omega_{подсинхр}$. Машину постоянного тока отключают от источника питания, а обмотку статора СД подключают к сети. При подключении происходят процессы самосинхронизации и втягивания СД в синхронизм, после чего обмотка возбуждения СД подключается к источнику. При пуске СД ОВ замыкается на сопротивление.

Рассмотренный режим пуска СД возможен только в системе Г-Д при наличии ДПТ на одном валу с СД. Мощность источника для питания ДПТ составляет $5 \div 7\% P_{сд}$. Устройство запуска позволяет осуществлять многократные пуски после технологических пауз и аварий, чем достигается эффект экономии электроэнергии (в отдельных случаях до 20%).

Глава 5

Системы многодвигательных электроприводов

Многодвигательным электроприводом называется система, содержащая несколько механически или электрически связанных двигателей, предназначенных для приведения в движение рабочего органа или механизма.

Если в систему привода входит два двигателя, работающие на общую рабочую машину или механизм, то такой ЭП называют двухдвигательным.

Многодвигательный ЭП получил весьма широкое распространение в ряде ведущих отраслей промышленности: в горной - это ЭП экскаваторов, шахтных подъемных машин, электровозов, конвейеров, в металлургической - ЭП непрерывных станов горячей и холодной прокатки и т.п. Многодвигательный ЭП незаменим в установках, где механизмы одного и того же агрегата расположены на значительном расстоянии, но при этом их движение должно быть согласовано с большой точностью (например, разводные мосты, затворы шлюзов, мостовые краны и др.).

Широкое применение двухдвигательного и многодвигательного ЭП объясняется следующими его основными свойствами и достоинствами:

- большой возможностью в отношении регулирования скорости и момента;
- возможностью создания мощных установок на базе серийных электрических машин относительно небольшой мощности, что позволяет улучшить общие массогабаритные показатели (т.е. применять многодвигательный привод на ту же мощность, что и однодвигательный, но с машинами меньшей мощности);
- бесспорной практичностью и надежностью, благодаря взаимозаменяемости машин, что является важным для обеспечения надежности технологических процессов;
- упрощением механического оборудования (в установках, где производственный механизм значительно удален от приводного двигателя);
- экономичностью по сравнению с однодвигательным, в силу того, что результирующие потери в многодвигательном ЭП меньше;
- меньшим суммарным моментом инерции, благодаря чему многодвигательный ЭП обеспечивает более высокое быстродействие и лучшие динамические показатели.
- меньшей стоимостью (стоимость двух двигателей на половинную мощность, как правило, меньше стоимости одного двигателя на полную мощность);
- возможностью использования в случаях, когда невозможна установка однодвигательного ЭП.

Классификация многодвигательных ЭП зависимости от того, каким образом осуществляется связь между отдельными двигателями приведена на рис.5.1.

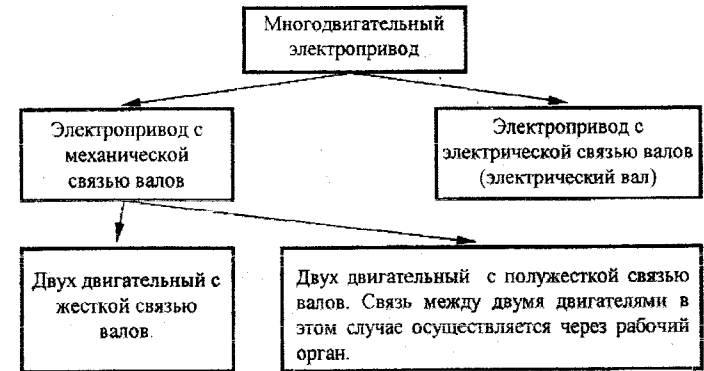


Рис. 5.1. Классификация систем многодвигательного электропривода

Кроме того, каждая из названных групп может быть разделена на многодвигательные ЭП постоянного и переменного тока.

Перейдем к рассмотрению одной из групп многодвигательного электропривода - двухдвигательного ЭП с механической связью валов.

Основанием для применения ЭП этой группы служат следующие его качества:

- возможность работы установки с меньшей производительностью в случае выхода из строя одного из двигателей (50% резерв.);
- возможность изменения рабочей скорости привода при переводе одного из двигателей в тормозной режим;
- повышение быстродействия ЭП за счет уменьшения момента инерции системы.

В ЭП этой группы могут быть использованы электрические двигатели постоянного или переменного тока, но, как правило, одного типа, одинаковой мощности и скорости вращения.

5.1. Двухдвигательный электропривод постоянного тока с механической связью валов

В зависимости от способа соединения якорных обмоток двухдвигательный ЭП постоянного тока делят на:

- ЭП с параллельным питанием якорных цепей;
- ЭП с последовательным питанием якорных цепей;
- ЭП с индивидуальным питанием якорных цепей.

Соответствующие схемы включения имеют вид, приведенный на рис.5.2-5.4:

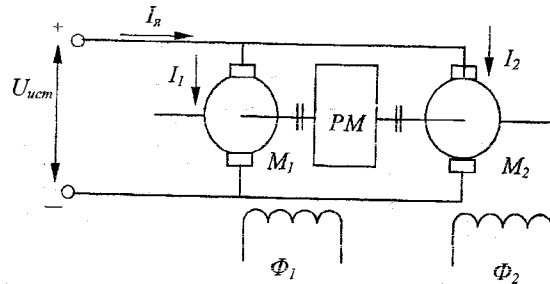


Рис. 5.2. Схема с параллельным питанием якорных цепей

Для схемы с параллельным питанием якорных цепей: $U_1 = U_2$;
 $U_{ист} \geq U_{ном.дв.}$; $I_{ист.} \geq 2I_{ном.дв.}$.

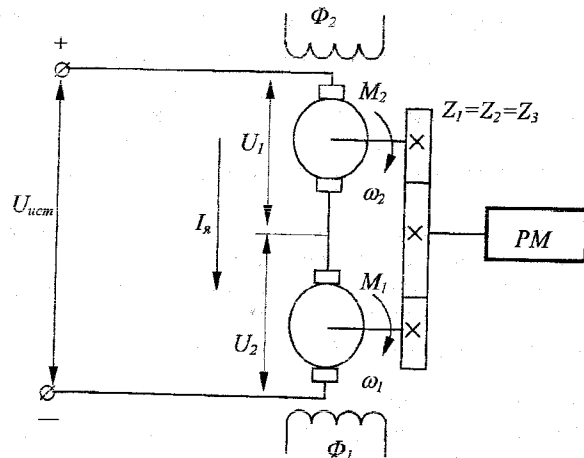


Рис. 5.3. Схема с последовательным питанием якорных цепей

Для схемы с последовательным питанием якорных цепей:
 $U_{ист.} \geq 2U_{ном.дв.}$; $I_{ист.} \geq I_{ном.дв.}$; $I_1 = I_2 = I_{я.}$.

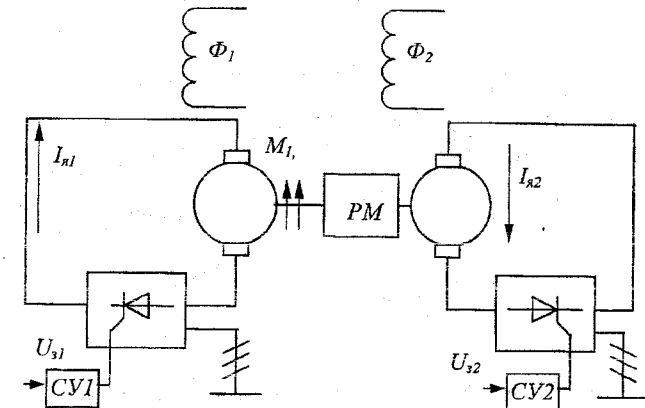


Рис. 5.4. Схема с независимым (индивидуальным) питанием якорных цепей

При создании систем двухдвигательного ЭП должны решаться следующие задачи:

- обеспечение равномерного распределения нагрузок между валами отдельных двигателей в статических и динамических режимах;
- обеспечение возможности выравнивания нагрузок в статических и динамических режимах;
- построение систем автоматического регулирования скорости привода.

Задача обеспечения равномерного распределения нагрузок между отдельными двигателями в двухдвигательном ЭП является наиболее важной при его работе как в статическом, так и в динамическом режимах. Чтобы уяснить сущность сказанного, рассмотрим характеристики и свойства двухдвигательного ЭП в различных случаях, для которых характерно равенство или отличие тех или иных параметров двигателей (например, сопротивлений якорных цепей или потоков возбуждения двигателей). Для расчета механических характеристик и анализа свойств двухдвигательного ЭП будет использован как графический, так и аналитический методы.

5.1.1. Графический метод расчета характеристик двухдвигательного ЭП

Абсолютно жесткое соединение валов при совместной работе обеспечивает одинаковую угловую скорость двигателям. Поэтому при наличии графиков механических характеристик каждого из двигателей механическая характеристика привода в целом может быть получена геометрическим сложением характеристик отдельных двигателей (рис. 5.5).

Для построения характеристик необходимо сложить значения $M_1(\omega)$ и $M_2(\omega)$ для двух произвольно заданных скоростей, например, ω_{01} и ω_{02} . Точки А и В будут соответствовать суммарному моменту $M_\Sigma = M_1 + M_2$.

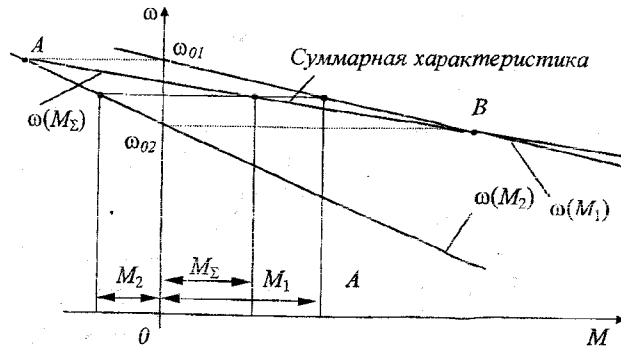


Рис. 5.5. Графический метод построения механической характеристики двухдвигательного ЭП постоянного тока

Достоинством графического метода является то, что он может использоваться для любых видов механических характеристик двигателей. Выполним графический расчет и анализ характеристик двухдвигательного ЭП в схеме с параллельным питанием якорных цепей для случаев, когда:

- паспортные данные машин идентичны (при этом $\kappa\Phi_1 = \kappa\Phi_2$; $R_1 = R_2$);
- потоки машин $\Phi_1 = \Phi_2$, а сопротивления якорных цепей $R_1 \neq R_2$;
- сопротивления якорных цепей $R_1 = R_2$, а потоки $\Phi_1 \neq \Phi_2$;
- сопротивления $R_1 \neq R_2$ и магнитные потоки $\Phi_1 \neq \Phi_2$.

Случай двухдвигательного электропривода с параметрами $\kappa\Phi_1 = \kappa\Phi_2$; $R_1 = R_2$:

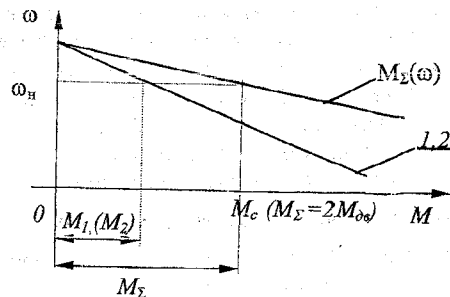


Рис. 5.6. Механическая характеристика двухдвигательного ЭП с одинаковыми параметрами двигателей

Из анализа характеристик можно сделать следующий вывод: при абсолютной идентичности характеристик нагрузка между двигателями распределяется

равномерно, а суммарный момент привода равен сумме моментов отдельных двигателей ($M_\Sigma = 2M_{0\phi}$). Жесткость характеристики привода выше жесткости характеристик двигателей.

В ряде случаев, в результате различия номинальных параметров машин (вследствие неравенства напряжений на якорях или обмотках возбуждения, неодинаковости воздушных зазоров, неодинаковой длины соединительных проводов, нагрева и т.п.), механические характеристики двигателей будут отличаться друг от друга, что приведет к неравномерности распределения механических и токовых нагрузок между двигателями.

Случай двухдвигательного привода когда потоки машин равны $\Phi_1 = \Phi_2$, а сопротивления якорных цепей не равны $R_1 \neq R_2$:

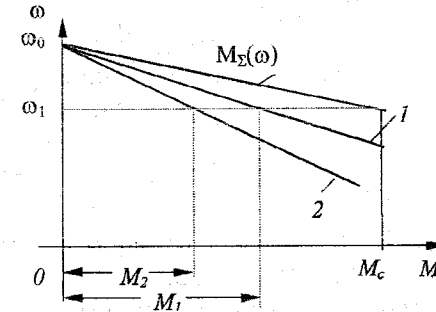


Рис. 5.7. Механическая характеристика двухдвигательного ЭП при различных сопротивлениях якорных цепей

Если, например, сопротивление якорной цепи второго двигателя больше чем у первого ($R_2 > R_1$), то характеристики этих машин будут иметь вид, представленный на рис.5.7. И хотя результирующая характеристика M_Σ по-прежнему проходит выше характеристик обеих машин, (т.е. жесткость характеристик выше), распределение моментов (нагрузок) между ними заметно изменится. Двигатель с меньшим сопротивлением якорной цепи окажется нагруженным больше, чем двигатель с большим сопротивлением. Таким образом, двигатель с меньшим сопротивлением может оказаться перегруженным как по моменту, так и по току ($I_1 = M_1 / \kappa\Phi_n$).

Случай двухдвигательного привода когда сопротивления якорных цепей равны $R_1 = R_2$; магнитные потоки не равны $\Phi_1 \neq \Phi_2$. В этом случае скорости идеального холостого хода не одинаковы. Суммарная характеристика $M_\Sigma(\omega)$ представлена на рис.5.8.

Анализ характеристик для данного случая позволяет сделать следующие выводы:

- жесткость суммарной характеристики привода выше, чем жесткость характеристик двигателей;

- двигатель с большей скоростью идеального холостого хода несет большую нагрузку;

- при некотором значении момента нагрузки (например M_{c2}) один из двигателей (тот, у которого скорость идеального холостого хода меньше, т.е. поток больше) вообще будет работать в генераторном режиме, и он будет являться дополнительной нагрузкой для двигателя с меньшим потоком.

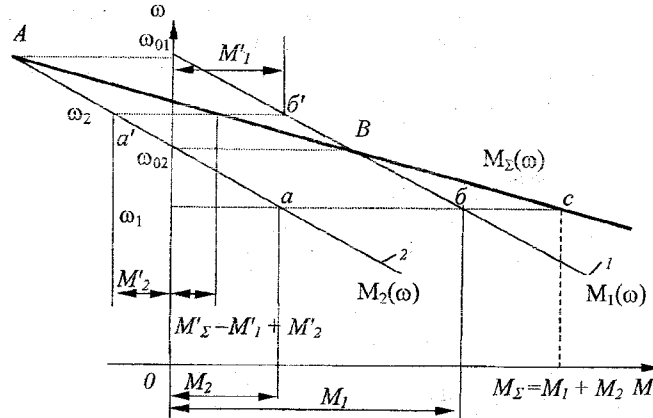


Рис. 5.8. Механическая характеристика двухдвигательного ЭП при неравенстве магнитных потоков

Таким образом, двигатель с меньшим потоком окажется перегруженным. Скорость двигателя с большим потоком при этом выше его скорости идеального холостого хода, что может оказаться недопустимым.

Наиболее неблагоприятным является случай, когда отличаются и сопротивления, и потоки машин, входящих в двухдвигательный ЭП ($R_1 \neq R_2$; $\Phi_1 \neq \Phi_2$), т.к. независимо от соотношения между R_1 и R_2 , Φ_1 и Φ_2 , при любой нагрузке на валу привода возможен только такой режим работы, когда одна из машин будет перегружена.

5.1.2. Аналитический метод расчета нагрузок двухдвигательного ЭП при параллельном и индивидуальном питании якорных цепей

Исходя из основных положений для двухдвигательного ЭП в схеме с параллельным питанием якорей (рис.5.2) следует, что момент на валу привода M_Σ равен сумме моментов от каждого двигателя, а скорость вращения обоих двигателей и привода в целом ввиду жесткой связи валов $\omega = \omega_1 = \omega_2$. Для анализа вопроса составим следующую систему уравнений:

$$\omega_1 = \frac{U_1 - I_1 \cdot R_1}{k\Phi_1};$$

$$\omega_2 = \frac{U_2 - I_2 \cdot R_2}{k\Phi_2};$$

$$M_c = M_1 + M_2 = k\Phi_1 \cdot I_1 + k\Phi_2 \cdot I_2;$$

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega. \quad (5.1)$$

Разрешим систему относительно токов I_1 и I_2 (напряжения U_1 и U_2 при индивидуальном питании, или U при параллельном питании якорей, а также сопротивления R_1 и R_2 , и потоки машин Φ_1 и Φ_2 считаем известными).

Тогда

$$\begin{cases} \frac{U_1 - I_1 \cdot R_1}{k\Phi_1} = \frac{U_2 - I_2 \cdot R_2}{k\Phi_2}; \\ M_c = k\Phi_1 \cdot I_1 + k\Phi_2 \cdot I_2. \end{cases} \quad (5.2)$$

Выразим ток, например I_1 из уравнения (5.3):

$$I_1 = \frac{M_c - k\Phi_2 \cdot I_2}{k\Phi_1}, \quad (5.3)$$

подставив в уравнение (5.2), получим:

$$U_1 \cdot k\Phi_2 - I_1 \cdot R_1 \cdot k\Phi_2 = U_2 \cdot k\Phi_1 - I_2 \cdot R_2 \cdot k\Phi_1;$$

$$U_1 \cdot k\Phi_2 - \frac{M_c - k\Phi_2 \cdot I_2}{k\Phi_1} \cdot R_1 \cdot k\Phi_2 = U_2 \cdot k\Phi_1 - I_2 \cdot R_2 \cdot k\Phi_1;$$

$$U_1 \cdot k\Phi_2 - U_2 \cdot k\Phi_1 - \frac{M_c \cdot R_1 \cdot k\Phi_2}{k\Phi_1} \cdot R_1 \cdot k\Phi_2 = U_2 \cdot k\Phi_1 - I_2 \cdot R_2 \cdot k\Phi_1;$$

$$U_1 \cdot k\Phi_2 - U_2 \cdot k\Phi_1 - \frac{M_c \cdot R_1 \cdot k\Phi_2}{k\Phi_1} = -I_2 \cdot R_2 \cdot k\Phi_1 - \frac{I_2 \cdot R_1 (k\Phi_2)^2}{k\Phi_1};$$

$$U_1 \cdot k\Phi_2 - U_2 \cdot k\Phi_1 - \frac{M_c \cdot R_1 \cdot k\Phi_2}{k\Phi_1} = -I_2 \left(R_2 k\Phi_1 + \frac{R_1 (k\Phi_2)^2}{k\Phi_1} \right);$$

$$I_2 = \frac{U_2 \cdot k\Phi_1^2 - U_1 \cdot k\Phi_1 \cdot k\Phi_2 + M_c \cdot R_1 \cdot k\Phi_2}{k\Phi_1 \cdot \left(R_2 \cdot k\Phi_1 + \frac{R_1 (k\Phi_2)^2}{k\Phi_1} \right)}.$$

Или окончательно

$$I_2 = \frac{(k\Phi_1)^2 \cdot U_2 - k\Phi_1 \cdot k\Phi_2 \cdot U_1 + M_c \cdot R_1 \cdot k\Phi_2}{k\Phi_1^2 \cdot R_2 + k\Phi_2^2 \cdot R_1}. \quad (5.4)$$

Подставив значения I_2 в формулу (5.3), получим в общем виде выражение для тока I_1 :

$$I_1 = \frac{M_c - k\Phi_2 \left[\frac{k\Phi_1^2 \cdot U_2 - k\Phi_1 \cdot k\Phi_2 \cdot U_1 + M_c \cdot R_1 \cdot k\Phi_2}{k\Phi_1^2 \cdot R_2 + k\Phi_2^2 \cdot R_1} \right]}{k\Phi_1}. \quad (5.5)$$

По формулам (5.4) и (5.5) несложно выполнить анализ перераспределения нагрузок между двигателями для различных случаев.

Случай двухдвигательного электропривода: $U_1=U_2=U$; $k\Phi_1=k\Phi_2=k\Phi$; $R_1=R_2=R$.

Из формулы (5.4):

$$I_2 = \frac{(k\Phi)^2 U - (k\Phi)^2 U + M_c \cdot R \cdot k\Phi}{(k\Phi)^2 \cdot R + (k\Phi)^2 \cdot R} = \frac{M_c \cdot R \cdot k\Phi}{2(k\Phi)^2 \cdot R} = \frac{M_c}{2k\Phi} = \frac{I_c}{2}.$$

Из формулы (5.5):

$$I_1 = \frac{M_c - k\Phi \left[\frac{k\Phi^2 \cdot U - k\Phi^2 \cdot U + M_c \cdot R \cdot k\Phi}{2 \cdot k\Phi^2 \cdot R} \right]}{k\Phi} = \frac{M_c}{k\Phi} - \frac{M_c}{2k\Phi} = \frac{I_c}{2}.$$

Таким образом, при абсолютно идентичных параметрах машин, входящих в двухдвигательный ЭП, механическая и токовая нагрузка между двигателями распределяется равномерно независимо от скорости вращения.

Случай двухдвигательного электропривода: $U_1=U_2=U$; $\Phi_1=\Phi_2=\Phi$; $R_1 \neq R_2$.

Подставив в формулу (5.4) соответствующие параметры, получим:

$$I_2 = \frac{U \cdot k\Phi^2 - U \cdot k\Phi^2 + M_c \cdot R_1 \cdot k\Phi}{k\Phi^2 (R_1 + R_2)} = \frac{M_c \cdot R_1}{k\Phi (R_1 + R_2)}.$$

Аналогично для I_1 :

$$I_1 = \frac{M_c - k\Phi \left[\frac{k\Phi^2 \cdot U - k\Phi^2 \cdot U + M_c \cdot R_1 \cdot k\Phi}{k\Phi^2 (R_1 + R_2)} \right]}{k\Phi} =$$

$$\frac{M_c}{k\Phi} - \frac{M_c \cdot R_1 \cdot k\Phi^2}{k\Phi^3 (R_1 + R_2)} = \frac{M_c \cdot k\Phi^2 \cdot R_1 + M_c \cdot k\Phi^2 \cdot R_2 - M_c \cdot R_1 \cdot k\Phi^2}{k\Phi^3 (R_1 + R_2)} =$$

$$\frac{M_c \cdot R_2 \cdot k\Phi^2}{(R_1 + R_2) k\Phi^3} = \frac{M_c \cdot R_2}{(R_1 + R_2) \cdot k\Phi}.$$

Таким образом,

$$I_1 = \frac{M_c \cdot R_2}{k\Phi (R_1 + R_2)}; \quad (5.6)$$

$$I_2 = \frac{M_c \cdot R_1}{k\Phi (R_1 + R_2)}; \quad (5.7)$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}; \quad (5.8)$$

т.е., при различных сопротивлениях якорных цепей двигателей токовая нагрузка распределяется обратно пропорционально их сопротивлениям.

Случай двухдвигательного привода: $U_1=U_2=U$; $R_1=R_2=R$; $k\Phi_1 \neq k\Phi_2$ ($k\Phi_1 = \alpha k\Phi_2$).

Из формулы (5.4) имеем:

$$I_2 = \frac{\alpha^2 \cdot k\Phi_2^2 \cdot U - \alpha \cdot k\Phi_2^2 \cdot U + M_c \cdot R \cdot k\Phi_2}{k\Phi_2^2 \cdot R + \alpha^2 \cdot k\Phi_2^2 \cdot R} =$$

$$\frac{\alpha^2 \cdot k\Phi_2^2 \left[U - \frac{U}{\alpha} + \frac{M_c \cdot R}{\alpha^2 \cdot k\Phi_2} \right]}{\alpha^2 \cdot k\Phi_2^2 \left[\frac{R}{\alpha^2} + R \right]} = \frac{\alpha \cdot U - U + \frac{M_c \cdot R}{\alpha}}{\alpha \cdot \frac{\alpha^2 + 1}{\alpha^2}} =$$

$$\frac{\left[\alpha^2 \cdot k\Phi_2 (\alpha \cdot U) + M_c \cdot R \right] \cdot \alpha^2}{\alpha^2 \cdot k\Phi_2 \cdot R (\alpha^2 + 1)} = \frac{k\Phi_2^2 \left[\alpha (\alpha \cdot U) + \frac{M_c \cdot R}{k\Phi_2} \right]}{k\Phi_2^2 \cdot R (\alpha^2 + 1)} =$$

$$= \frac{\alpha \cdot U (\alpha - 1) + \frac{M_c \cdot R}{k\Phi_2}}{R (\alpha^2 + 1)} = \frac{\alpha \cdot U (\alpha - 1) + \frac{M_c \cdot R}{k\Phi_2}}{R (\alpha^2 + 1)}.$$

Получим окончательно:

$$I_2 = \frac{\frac{\alpha \cdot U}{R} (\alpha - 1) + \frac{M_c}{k\Phi_2}}{\alpha^2 + 1}; \quad (5.9)$$

$$I_1 = \frac{\frac{\alpha \cdot M_c}{k\Phi_2} - \frac{U}{R} (\alpha - 1)}{\alpha^2 + 1}. \quad (5.10)$$

Из формул (5.9) и (5.10) следует, что при любых α токи двигателей (а следовательно и моменты) неодинаковы.

5.1.3. Аналитический метод расчета распределения нагрузок между двигателями двухдвигательного электропривода при последовательном питании якорных обмоток

Основными положениями, характеризующими схему двухдвигательного ЭП с последовательным питанием якорей машин являются: равенство токов $I_a = I_1 = I_2$; $M_c = M_1 + M_2$; равенство скоростей $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, т.е. по якорным цепям протекает ток одной и той же величины независимо от сопротивлений; что же касается моментов M_1 и M_2 , то они могут оказаться как одинаковыми (в случае, когда $\Phi_1 = \Phi_2$), так и различными (если $\Phi_1 \neq \Phi_2$).

Таким образом, для общей якорной цепи можно составить следующую систему уравнений (5.11):

$$\begin{aligned} U_1 &= k\Phi_1 \cdot \omega + I_a \cdot R_1; \\ U_2 &= k\Phi_2 \cdot \omega + I_a \cdot R_2; \\ U_1 + U_2 &= U; \\ M_c &= k\Phi_1 \cdot I_a + k\Phi_2 \cdot k\Phi_2 \cdot I \end{aligned} \quad (5.11)$$

Решим эту систему относительно напряжений U_1 и U_2 :

$$\frac{U_1 - I_a \cdot R_1}{k\Phi_1} = \frac{U_2 - I_a \cdot R_2}{k\Phi_2} \quad (5.12)$$

Выразим ток

$$I_a = \frac{M_c}{k\Phi_1 + k\Phi_2}$$

и напряжение, например, U_1 :

$$U_1 = U - U_2$$

Тогда

$$\begin{aligned} (U - U_2) \cdot k\Phi_2 - k\Phi_2 \cdot I_a \cdot R_1 &= k\Phi_1 \cdot U_c - k\Phi_1 \cdot I_a \cdot R_2 \\ U \cdot k\Phi_2 - U_2 \cdot k\Phi_2 - \frac{k\Phi_2 \cdot R_1 \cdot M_c}{k\Phi_1 + k\Phi_2} &= k\Phi_1 \cdot U_2 - \frac{k\Phi_1 \cdot R_2 \cdot M_c}{k\Phi_1 + k\Phi_2} \\ k\Phi_1 \cdot U_2 + k\Phi_2 \cdot U_2 &= U k\Phi_2 - \frac{k\Phi_1 \cdot R_1 \cdot M_c}{k\Phi_1 + k\Phi_2} + \frac{k\Phi_1 \cdot R_2 \cdot M_c}{k\Phi_1 + k\Phi_2} \\ U_2 \cdot (k\Phi_1 + k\Phi_2) &= U \cdot k\Phi_2 + \frac{k\Phi_1 \cdot R_2 \cdot M_c - k\Phi_2 \cdot R_1 \cdot M_c}{k\Phi_1 + k\Phi_2} \\ U_2 \cdot (k\Phi_1 + k\Phi_2) &= \frac{(k\Phi_1 + k\Phi_2) \cdot k\Phi_2 \cdot U + (k\Phi_1 \cdot R_2 - k\Phi_2 \cdot R_1) \cdot M_c}{k\Phi_1 + k\Phi_2} \\ U_2 &= \frac{(k\Phi_1 + k\Phi_2) \cdot k\Phi_2 \cdot U + (k\Phi_1 \cdot R_2 - k\Phi_2 \cdot R_1) \cdot M_c}{(k\Phi_1 + k\Phi_2)^2} \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$U_1 = U - U_2 \quad (5.14)$$

Анализируя формулу (5.13), несложно видеть, что при равенстве сопротивлений ($R_1 = R_2 = R$) и потоков машин ($k\Phi_1 = k\Phi_2 = k\Phi$) напряжение на каждом из двигателей

$$U_2 = \frac{2 \cdot k\Phi^2 \cdot U + 0}{4 \cdot k\Phi^2} = \frac{U}{2}, \quad (5.15)$$

т.е. напряжение на каждом из двигателей равно половине напряжения источника питания.

При различных R_1 и R_2 или Φ_1 и Φ_2 напряжения на двигателях также различны, что следует учитывать при расчете систем двухдвигательного ЭП.

Можно показать, что неравенство потоков машин $\Phi_1 \neq \Phi_2$ (например, $\Phi_2/\Phi_1 = \alpha$, а $\Phi_1 = \Phi_{ном}$) проявляется в двухдвигательных ЭП крайне

неблагоприятно. Во-первых, несмотря на то, что токи в якорях машин $I_1 = I_2$, момент M_1 не равен M_2 , т.к.

$$M_1 = k\Phi_1 \cdot I_a = k\Phi_n \cdot I_a, \quad M_2 = \alpha k\Phi_n \cdot I_a$$

то есть, второй двигатель оказывается недогруженным по моменту.

Кроме того, исходя из уравнения

$$M_c = (k\Phi_1 + k\Phi_2) \cdot I_a; \quad (5.16)$$

$$I_a = \frac{M_c}{k\Phi_1 + k\Phi_2} = \frac{M_c}{k\Phi_n + \alpha \cdot k\Phi_n} = \frac{M_c}{k\Phi_n(1 + \alpha)}, \quad (5.17)$$

это значит, что при уменьшении потока одной из машин обе машины окажутся перегружены по току.

5.1.4. Методы выравнивания нагрузок в двухдвигательном электроприводе постоянного тока

Как было показано выше, в результате целого ряда причин нагрузка двигателей двухдвигательного ЭП может оказаться неодинаковой, что приводит к перегрузке одного из двигателей и ухудшению условий работы системы. Следовательно, еще на стадии проектирования возникает необходимость создания различных систем или способов для устранения этого явления. В схемах с параллельным питанием якорей это осуществляют следующими методами.

Выравнивание нагрузок на валах двигателей воздействием на магнитный поток

Воздействие на магнитный поток двигателей является основным методом выравнивания нагрузок в двухдвигательном ЭП постоянного тока. В качестве сигналов о величине токовой нагрузки каждого двигателя используются значения токов в якорных цепях, измеряемые с помощью датчиков тока.

Схема для выравнивания нагрузок имеет вид, приведенный на рис. 5.9.

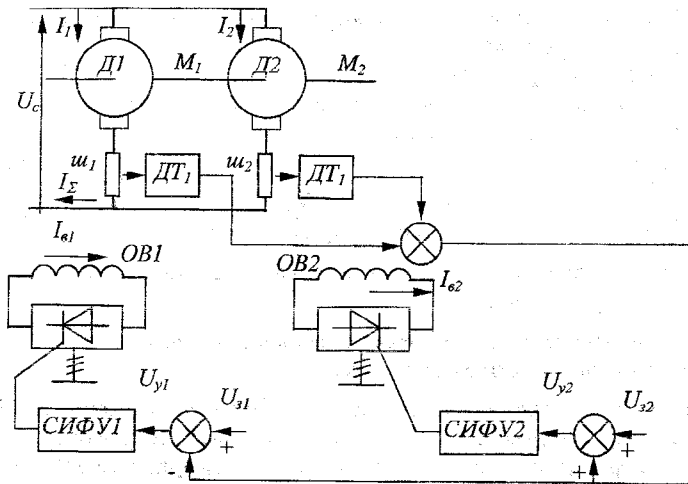


Рис. 5.9. Схема для выравнивания нагрузок с воздействием на магнитный поток

Пусть, например, в двигателе D_1 магнитный поток снизился. Это означает, что скорость идеального холостого хода этого двигателя увеличится по отношению к скорости идеального холостого хода двигателя D_2 (кривая 1 на рис. 5.10), и ток в цепи якоря D_1 станет больше тока в цепи якоря D_2 . При этом, если напряжение обратной связи $U_{oc} = \kappa_{oc}(I_2 - I_1)$, то сигнал обратной связи становится отрицательным, и напряжение управления в СИФУ1 $U_{y1} = U_{s1} - U_{oc}$ уменьшится; при этом уменьшится угол управления тиристорами и выходное напряжение на тиристорном возбудителе $U_{mв}$, а, следовательно, и на обмотке возбуждения D_1 , возрастет.

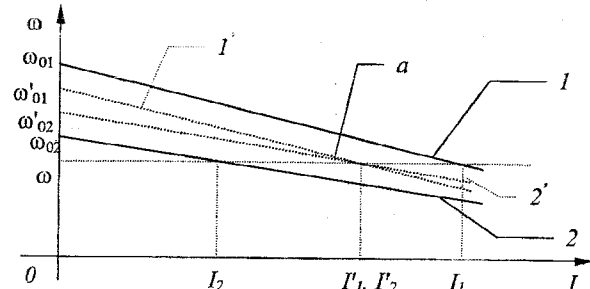


Рис. 5.10. Механические характеристики двигателей двухдвигательного ЭП при выравнивании нагрузок воздействием на магнитный поток

В результате поток двигателя D_1 возрастет (характеристика 1'). Благодаря этому при некоторой скорости ω ток в якорной цепи машины станет равным I_1' . В СИФУ2 сигнал обратной связи поступит с положительным знаком, что, в итоге приведет к некоторому снижению потока, при котором скорости вращения ω будет соответствовать ток в якорной цепи D_2 , равный I_2' (характеристика 2'). Таким образом, благодаря наличию такой схемы выравнивания возможно автоматически установить некоторую рабочую скорость вращения привода, при которой для заданной нагрузки на валу возможно равномерное распределение токов в цепях якорей. Механическая нагрузка двигателей в данном случае уже неодинакова.

Выравнивание нагрузок переключением якорных цепей с параллельного на последовательное питание

При неравенстве сопротивлений якорных цепей двигателей ($R_1 \neq R_2$) равномерная нагрузка двигателей по току может быть достигнута путем последовательного включения якорей при достаточном напряжении сети для заданной угловой скорости (в этом случае токи в якорях машин становятся одинаковыми). Чтобы достичь выравнивания моментов, необходимо дополнительно воздействовать на магнитные потоки двигателей. Построение системы автоматического регулирования для выравнивания моментов в данном случае затруднено тем, что очень трудно получить информацию о фактической величине нагрузок двигателей.

Достоинством схемы с последовательным включением якорей является то, что в ней происходит самовыравнивание нагрузок вследствие того, что при $R_1 \neq R_2$ напряжения на якорях U_1 и U_2 также будут неодинаковы (рис.5.11, прямые 1' и 2').

Рассмотренный метод применим в приводах малой и средней мощности.

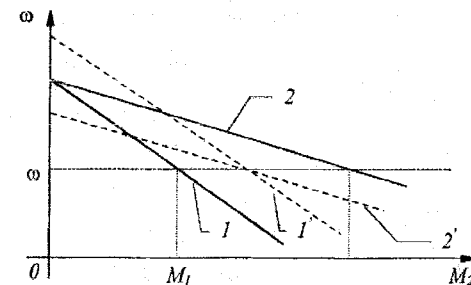


Рис. 5.11. Механические характеристики двигателей двухдвигательного ЭП при переключении с параллельного на последовательное питание

Выравнивание нагрузок в схеме с индивидуальным питанием якорных цепей

Этот вариант двухдвигательного ЭП постоянного тока обладает наибольшими возможностями в отношении выравнивания нагрузок. Если в схеме используются источники регулируемого питания, то выравнивания нагрузок можно достичь за счет регулирования напряжения на якорах или в обмотках возбуждения машин.

Так, например, если характеристики двигателей, входящих в ЭП, имеют вид 1 и 2 (рис. 5.12), то увеличение U_{a2} и уменьшение U_{a1} приведет к виду характеристик 1' и 2' (то есть различие между M_1' и M_2' уже меньше, чем между M_1 и M_2):

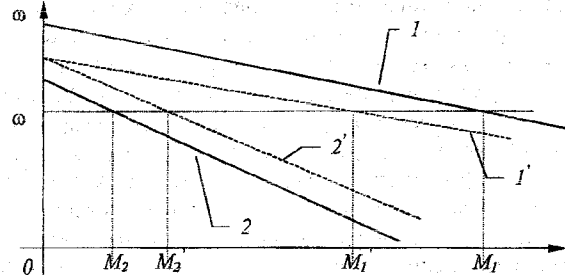


Рис. 5.12. Выравнивание нагрузок в схеме с индивидуальным питанием якорных цепей

Чтобы сделать характеристики абсолютно одинаковыми, достаточно в якорную цепь первого двигателя ввести добавочное сопротивление $R_{доб}$.

В качестве датчиков нагрузки в такой схеме двухдвигательного ЭП обычно используют датчики тока якорных цепей. Схема выравнивания с воздействием на якорное напряжение приведена на рис. 5.13. Работа схемы легко анализируется с учетом ранее отмеченных положений.

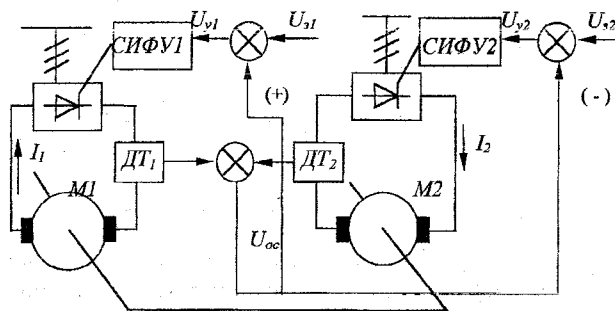


Рис. 5.13. Схема выравнивания нагрузок в двухдвигательном ЭП при индивидуальном питании якорных цепей

5.2. Асинхронный двухдвигательный электропривод с жесткой связью валов

Необходимость обеспечения высокой производительности установок с приводами переменного тока (например, подъемно-транспортных машин) требует возможности получения механических характеристик асинхронного двигателя с малой крутизной как в двигательном, так и в тормозном режимах, обеспечивающих низкие и устойчивые скорости.

Одним из решений этой задачи является применение двухдвигательного асинхронного ЭП, комплектуемого из двух асинхронных двигателей (АД), или из АД с вспомогательным тормозным генератором постоянного тока.

Помимо перечисленных ранее для двухдвигательного ЭП постоянного тока свойств, ЭП на основе асинхронных двигателей позволяет реализовать следующие функции:

- получить искусственные жесткие характеристики, необходимые для некоторых технологических процессов;
- получить большой, по сравнению с асинхронным однодвигательным ЭП, диапазон регулирования скорости;
- получить устойчивые малые скорости перед остановкой для точного торможения.

В двухдвигательном асинхронном ЭП обычно используют два одинаковых двигателя с фазным ротором (каждый из АД выбирается на полную мощность нагрузки). Ввиду малости номинального скольжения АД колебательность распределения нагрузок для них более существенна, а выравнивание их затруднено по сравнению с МПТ из-за сложности определения моментов каждого из двигателей. Поэтому обязательным условием, обеспечивающим нормальное распределение нагрузок в двухдвигательном асинхронном приводе, является условие выбора двигателей с одинаковым номинальным скольжением.

Простейшая схема такого привода приведена на рис. 5.14.

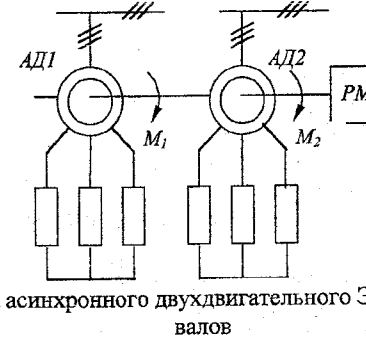


Рис. 5.14. Схема асинхронного двухдвигательного ЭП с жесткой связью валов

При работе обеих машин в двигательном режиме обмотки статоров включают на сеть таким образом, чтобы обеспечить одинаковое направление моментов каждого из двигателей. Так как роторы жестко связаны, то результирующий момент всегда будет равен алгебраической сумме моментов от двигателей, входящих в систему. Общий момент инерции в асинхронном двухдвигательном ЭП меньше, чем в однодвигательном ЭП той же мощности, следовательно, быстродействие этих систем выше по сравнению с индивидуальным приводом.

На рисунке 5.15 приведены механические характеристики для случая, когда в силу неодинаковости параметров машин, вызванных либо различием в паспортных данных, либо эксплуатационными причинами, характеристики двигателей АД1 и АД2 имеют различные значения номинальных скольжений S_{n1} и S_{n2} .

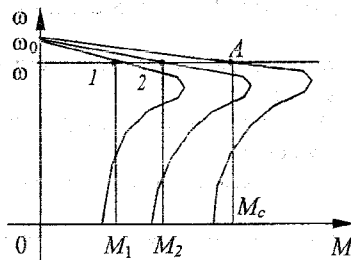


Рис. 5.15. Механические характеристики асинхронных двигателей с различными параметрами

В этом случае (при условии, что двигатели имеют одинаковые по величине номинальные моменты M_n и номинальные мощности P_n) статический момент нагрузки M_c распределится между двигателями следующим образом.

Момент на валу двигателя АД1 в области рабочих нагрузок может быть выражен из условия пропорциональности между скоростью вращения и моментом на валу:

$$M_1 = (M_{n1}/S_{n1}) \cdot S, \quad (5.18)$$

а момент на валу АД2:

$$M_2 = (M_{n2}/S_{n2}) \cdot S. \quad (5.19)$$

Тогда результирующий момент, развиваемый приводом:

$$M_\Sigma = M_c = (M_{n1}/S_{n1} + M_{n2}/S_{n2}) S = (\gamma_1 + \gamma_2) \cdot S, \quad (5.20)$$

где $\gamma_1 = M_{n1}/S_{n1}$; $\gamma_2 = M_{n2}/S_{n2}$.

Скольжение привода при нагрузке на валу, равной M_c :

$$S = M_c / (\gamma_1 + \gamma_2)$$

Момент, развиваемый каждым из двигателей:

$$M_1 = (\gamma_1 / (\gamma_1 + \gamma_2)) \cdot M_c; \quad M_2 = (\gamma_2 / (\gamma_1 + \gamma_2)) \cdot M_c \quad (5.21)$$

Из этих формул несложно сделать вывод, что больше нагруженным будет асинхронный двигатель с меньшим скольжением.

Равенство моментов, развиваемых двигателями двухдвигательного ЭП, будет возможно только при условии, когда номинальные скольжения будут одинаковыми ($S_{n1} = S_{n2}$).

Недостатками рассмотренной схемы привода являются большая вероятность неравномерной загрузки двигателей, ведущая как правило, к недоиспользованию одного из двигателей и небольшой диапазон регулирования скорости в области допустимых нагрузок.

Улучшить свойства асинхронного двухдвигательного ЭП в рассмотренной схеме удастся путем введения достаточно больших $R_{доб}$ в цепь ротора, однако это приводит к снижению жесткости характеристик и увеличению электрических потерь в приводе.

Более перспективными в отношении распределения нагрузок на двигатели и их регулировочных возможностей являются специальные схемы включения, рассматриваемые ниже.

5.2.1. Двухдвигательный асинхронный электропривод с параллельным включением роторных цепей на общий реостат

Схема включения роторных цепей двигателей имеет вид, приведенный на рис. 5.16.

Равномерное распределение нагрузки между двигателями может быть обеспечено при одинаковых паспортных данных машин, причем двигатели должны быть включены таким образом, чтобы сдвиг фаз между э.д.с. роторных цепей $\theta = 180^\circ$, т.е. э.д.с. находятся в противофазе (рис. 5.16, б). В этом случае роторные э.д.с. двигателей будут одинаковыми по модулю ($E_{21} = E_{22}$) и встречно направленными, а роторные токи замыкаются на внешний реостат. Моменты двигателей, пропорциональные токам роторов, также будут одинаковыми.

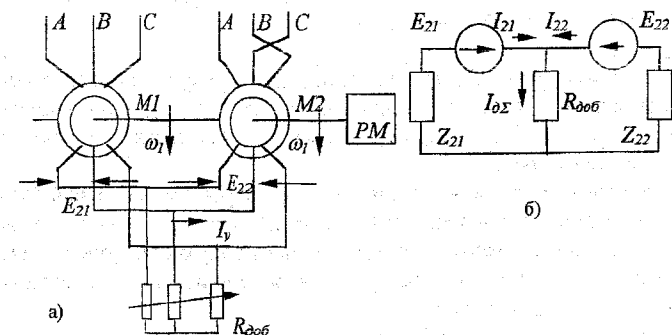


Рис. 5.16. Схема асинхронного двухдвигательного ЭП с параллельным включением роторных цепей на общий реостат (а) и схема замещения для фазы роторной цепи (б)

С этой целью при сборке привода предварительно выполняют фазировку роторов путем включения статорных обмоток на однофазную сеть 380 В. В цепь роторов включают вольтметр и проворачивая вал одной из машин, достигают на вольтметре отсутствия напряжения (рис. 5.17):

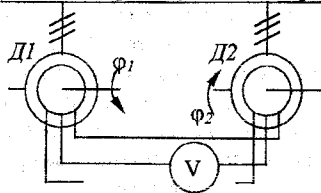


Рис. 5.17. Схема для фазировки роторов двигателей

Если двигатели сфазированы, как показано на векторной диаграмме (рис. 5.18), то $E_{21} = -E_{22}$.

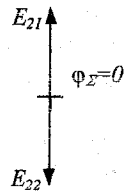


Рис. 5.18 Векторная диаграмма фазировки роторов двигателей

Моменты двигателей одинаковы и равны:

$$M_1 = C_1 \Phi_1 I_{21} \cos \psi_{21}; \quad (5.22)$$

$$M_2 = C_2 \Phi_2 I_{22} \cos \psi_{22}.$$

А так как $C_1 = C_2$ (конструктивные параметры одинаковы); $\Phi_1 = \Phi_2$ (общая сеть); $\cos \psi_{21} = \cos \psi_{22}$ (так как $R_{21} = R_{22}$; $X_{21} = X_{22}$), то и токи в роторных цепях одинаковы, а их сумма

$$I_{\Sigma} = I_{21} + I_{22} \quad (5.23)$$

определяет суммарный ток, протекающий через добавочное сопротивление. Максимум значения тока достигается в случае, если E_{21} и E_{22} направлены навстречу друг другу. Максимум тока соответственно определяет и максимум момента машин.

Таким образом, в данной схеме включения равномерное распределение нагрузки и обеспечение максимальной величины результирующего момента возможно только в случае полной идентичности параметров обеих машин и при условии такого их включения, которое обеспечивает угол сдвига между э.д.с. роторных цепей $\theta = 180^\circ$.

Если между э.д.с. E_{21} и E_{22} имеется фазовый сдвиг, то в общей цепи роторов возникает контур, по которому будет протекать уравнивающий ток. Этот ток можно определить на основании векторной диаграммы (рис. 5.19).

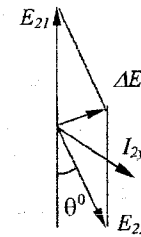


Рис. 5.19. Векторная диаграмма ЭДС роторов при сдвиге фаз

$$\Delta E = 2 E_{21} \cdot \sin(\theta/2)$$

$$I_{2y} = \Delta E / 2 Z_{\text{рот}} = (\Delta E \cdot E_{2n}) / (2 Z_{\text{рот}} \cdot E_{2n}) = (\Delta E / 2 E_n) \cdot I_{\text{к.з.}} \quad (5.24)$$

Таким образом даже при очень малых по величине ΔE (т.е. θ составляет всего несколько электрических градусов) уравнивающий ток, как видно из приведенного выше выражения, будет уже близок к номинальному. При этом один из двигателей будет работать в двигательном, а другой в тормозном режиме. Величина ΔE и соответствующий ток I_y зависит от угла сдвига фаз между E_{21} и E_{22} , а угол сдвига фаз, в свою очередь, зависит от числа пар полюсов и пространственного сдвига в положении валов машин. (чем тихоходней двигатель, т.е. чем больше число пар полюсов p , тем хуже условия работы двигателей).

Например, при $\theta_\phi \approx 3,3$ эл. град., $p = 6$, $S \approx 1$ (т.е. при работе с малыми скоростями) общий угол сдвига фаз для э.д.с. роторов $\theta_s = \theta_\phi \cdot p \approx 3,3 \cdot 6 \approx 20^\circ$. Следовательно:

$$\Delta E = 2 E_{2n} \cdot \sin(\theta_s/2) \approx 2 E_{2n} \cdot 0,17 = 0,34 \cdot E_{2n};$$

$$I_y = \Delta E / 2 Z_2 = (0,34 \cdot E_{2n}) / (2 Z_2) = 0,17 \cdot I_{\text{к.з.}} \approx I_n.$$

Таким образом, основной недостаток рассмотренной схемы в том, что даже малые величины ΔE в тихоходных двигателях могут вызвать в роторных цепях токи большие токов номинальных. Поэтому в тихоходных вариантах ЭП схема практически не работоспособна. В случае упругой связи между валами уравнивающий ток, наоборот, будет оказывать выравнивающее воздействие на скорости двигателей.

5.2.2. Двухдвигательный асинхронный электропривод с последовательно включенным реостатом в роторную цепь

Один из способов, позволяющий предотвратить значительное расхождение в нагрузках двигателей в двухдвигательном асинхронном ЭП, может быть реализован с помощью схемы, в которой роторные цепи соединены последовательно (рис. 5.20).

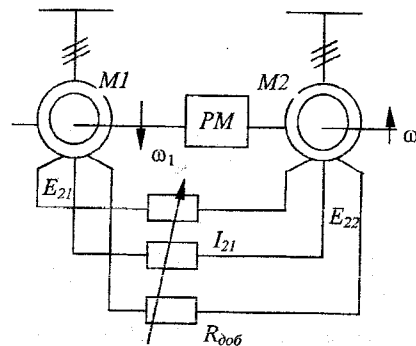


Рис. 5.20. Схема асинхронного двухдвигательного ЭП с последовательно включенным реостатом в цепь роторов

При этом полное использование машин, т.е. работа их с током и моментом, таким же по величине, как и при работе в естественной схеме включения при заданном скольжении может быть получена, если вторичная ЭДС будут складываться арифметически. Для этого необходимо, чтобы, когда одна из них действует изнутри обмотки к кольцам, другая в этот момент действовала бы по направлению от колец внутрь, т.е. направление ЭДС обеих машин во внешней (роторной) цепи должно совпадать (как показано на схеме замещения рис. 5.21).

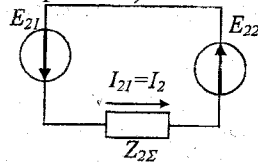


Рис. 5.21. Схема замещения цепи роторов

Предварительная фазировка двигателей производится на максимум показаний вольтметра, т.е. угол сдвига роторных э.д.с. равен нулю.

Если машины имеют одинаковые паспортные данные и угол сдвига в положении роторов $\varphi=0$, то э.д.с., наводимые в роторах, равны между собой а э.д.с. во внешней роторной цепи равна их сумме:

$$E_{2\Sigma} = E_{21} + E_{22} = 2E_{21} \quad (5.25)$$

Ток в роторных цепях обеих машин один и тот же и равен:

$$I_{\Sigma \text{рот}} = (E_{21} + E_{22}) / 2 Z_{\text{рот}} = 2E_{21} / 2 Z_{\text{рот}} = I_{21} = I_{22} \quad (5.26)$$

Если же угол взаимного сдвига роторов, а следовательно, и фазовый сдвиг между E_{21} и E_{22} составляет θ_ϕ град. (рис. 5.22),

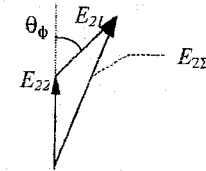


Рис. 5.22. Векторная диаграмма э.д.с. роторов двигателей при сдвиге фаз то суммарная э.д.с. роторной цепи

$$E_{2\Sigma} = 2E_{21} \cos(\theta_\phi/2) \quad (5.27)$$

Так, например, при $\theta_\phi \approx 20$ эл. град.

$$E_{2\Sigma} = 2E_{21} \cos(20/2) \approx 0,98 \cdot 2E_{21}$$

т.е., с увеличением угла рассогласования э.д.с. в роторной цепи будет уменьшаться.

Ток в роторной цепи при наличии угла рассогласования роторов, то есть фазовый сдвиг между э.д.с., приводит к уменьшению тока. Это эквивалентно снижению потока машины (т.е. питающего напряжения). Как правило, реальный сдвиг в угловых положениях роторов не приводит к недопустимому снижению э.д.с., поэтому схема вполне работоспособна, а ее основной недостаток - удвоенное напряжение в роторной цепи

$$I_{2\text{к.з.}} = \frac{2E_{2\Sigma}(s)}{2\sqrt{R_2^2 + X_2^2 s^2}} = \frac{2E_{21} s \cos\left(\frac{\theta_\phi}{2}\right)}{2\sqrt{R_2^2 + X_2^2 s^2}} \approx \frac{2E_{21} s \cos\left(\frac{\theta_\phi}{2}\right)}{X_{21}} \approx \\ \approx I_{2\text{к.з.}} \cos\left(\frac{\theta_\phi}{2}\right) \approx 0,95 I_{2\text{к.з.}}$$

Если принудительно изменять фазовый сдвиг между E_{21} и E_{22} (в приводах с поворотным статором это выполняется с помощью специального серводвигателя, установленного на статоре одной из машин), то можно получить семейство характеристик (рис. 5.23),

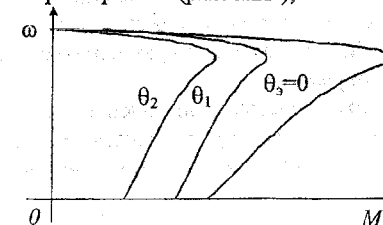


Рис. 5.23. Семейство механических характеристик двухдвигательного асинхронного ЭП при принудительном сдвиге фаз роторных э.д.с.

аналогичных характеристикам АД при изменении напряжения питания, т.е. такой ЭП можно использовать и для регулирования скорости, но при этом

следует помнить, что с увеличением угла рассогласования электромагнитный момент привода уменьшается, и необходимо ограничивать нагрузку.

В ряде случаев двухдвигательный асинхронный ЭП используют для получения устойчивой работы привода при малых скоростях (например, в подъемных установках, где требуется точная остановка при торможении с малой скоростью). Получить соответствующие характеристики двухдвигательного асинхронного привода можно в этом случае, когда одна из машин работает в двигательном режиме, а другая в режиме противовключения (рис. 5.24, а). При этом АД могут использоваться как с короткозамкнутым, так и с фазным ротором.

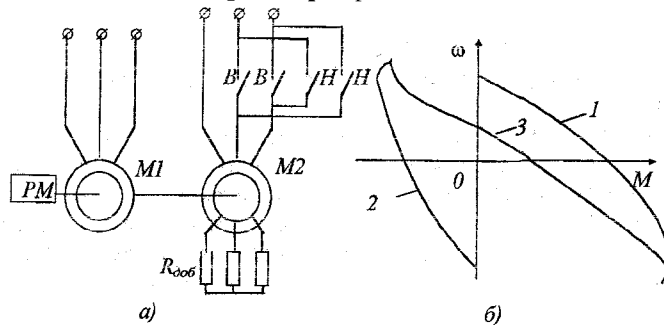


Рис. 5.24. Схема асинхронного двухдвигательного ЭП для получения искусственных характеристик (а) и вид получаемой характеристики привода (б).

Механические характеристики двигателей 1 и 2 и результирующая 3 для двухдвигательного привода приведены на рис. 5.24, б.

Уравнение результирующей характеристики 3

$$M = 2M_{\kappa 1} / (S/S_{\kappa 1} + S_{\kappa 1}/S) - 2M_{\kappa 2} / ((2-S)/S_{\kappa 2} + S_{\kappa 2}/(2-S)) \quad (5.28)$$

(при одинаковых параметрах двигателей $M_{\kappa 1} = M_{\kappa 2}$).

Как видно из графика, результирующая характеристика 3 имеет в двигательном режиме достаточно большую жесткость при малых скоростях. Однако перегрузочная способность привода заметно снижается, поэтому диапазон регулирования скорости весьма невелик, а потери равны сумме потерь от двух двигателей, причем основную нагрузку несет двигатель, работающий в двигательном режиме.

Для улучшения характеристик (повышения их жесткости при сохранении перегрузочной способности) применяют схему, в которой одна из машин работает в режиме динамического торможения (рис. 5.25).

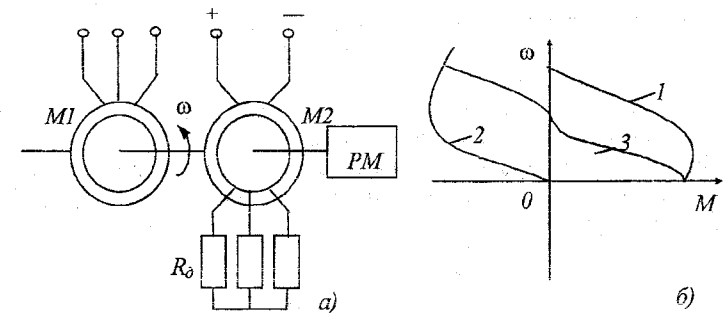


Рис. 5.25. Схема включения двигателей двухдвигательного ЭП для получения искусственных характеристик с повышенной жесткостью

Изменяя величину добавочного сопротивления R_d в цепи ротора, можно регулировать угловую скорость идеального холостого хода результирующей характеристики 3 при неизменной перегрузочной способности.

Основным недостатком этой схемы является низкий КПД вследствие больших потерь, так как на пониженных скоростях энергия, получаемая из сети, в значительной мере расходуется в двигателе, работающем в тормозном режиме. Поэтому рассмотренные выше схемы применяют только в приводах, работающих в кратковременном режиме.

5.3. Двухдвигательный синхронный электропривод с жесткой связью валов

Схема электропривода с синхронными двигателями приведена на рис. 5.26.

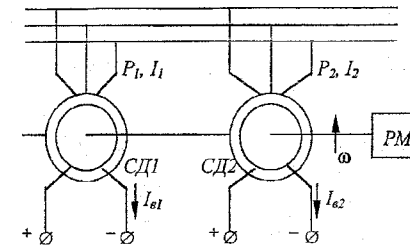


Рис. 5.26. Схема синхронного двухдвигательного ЭП

Так как валы двигателей жестко связаны, то суммарный момент, развиваемый приводом, равен сумме моментов двигателей:

$$M_{\Sigma} = M_1 + M_2.$$

При этом, если СД, входящие в систему двухдвигательного ЭП, имеют одинаковые паспортные данные и токи возбуждения $I_{e1} = I_{e2}$, то моменты их будут также одинаковы, а скорость вращения привода

$$\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0 = 2\pi f/p.$$

Сказанное выше справедливо только при условии отсутствия рассогласования в угловых положениях роторов машин.

Воспользовавшись угловой характеристикой синхронного двигателя, отражающей зависимость момента машины от угла выбега ротора θ , приведенной на рис. 5.27,

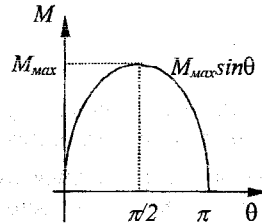


Рис. 5.27. Угловая характеристика синхронного двигателя

и ее аналитическим выражением

$$M = k E U \sin \theta, \quad (5.29)$$

где $k = 3/\omega_0 X_c$; X_c - индуктивное сопротивление фазы статора; ω_0 - синхронная скорость СД, установив особенности работы и распределения нагрузок в синхронном двухдвигательном приводе.

Распределение нагрузок в двухдвигательном ЭП при одинаковых токах возбуждения

Моменты, развиваемые двигателями, пропорциональны токам возбуждения обмоток роторов и для двух конструктивно одинаковых машин с одинаковыми токами возбуждения равны (рис. 5.28).

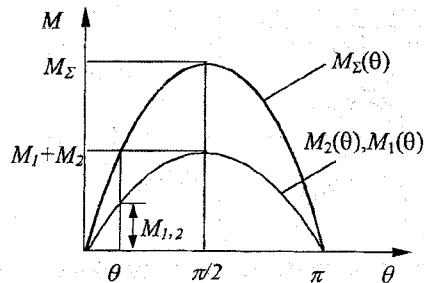


Рис. 5.28. Распределение нагрузки между двигателями для случая, когда токи возбуждения одинаковы

Распределение нагрузки между двигателями при неравенстве токов возбуждения

Если токи возбуждения двигателей отличаются ($I_{e1} \neq I_{e2}$), то характеристики двигателей и привода будут иметь вид показанный на рис. 5.29.

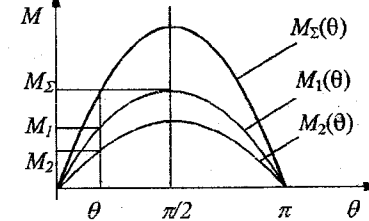


Рис. 5.29. Распределение нагрузки между двигателями при неравенстве токов возбуждения

Из характеристик видно, что при отсутствии рассогласования в положении роторов двигатель с большим по величине током возбуждения развивает больший момент ($M_1 > M_2$). При этом суммарный момент привода для одних и тех же углов выбега ротора несколько меньше, чем в случае, равенства токов возбуждения. Это является существенным недостатком и требует принятия мер по его устранению (выравнивание нагрузок) еще на стадии проектирования двухдвигательного синхронного ЭП.

Распределение нагрузки между двигателями при наличии углового рассогласования роторов

При наличии углового рассогласования роторов нагрузка между двигателями распределяется неравномерно.

Так как валы жестко связаны, то

$$\text{при } \Delta\theta = 0 - M_\Sigma = M_1 + M_2 = 2M_1$$

$$\text{при } \Delta\theta = \pi - M_\Sigma = 0,$$

то есть с увеличением угла рассогласования нагрузка не только распределяется неравномерно, но при определенных $\Delta\theta$ снижается момент, развиваемый электроприводом. Так, если имеется некоторый угол рассогласования $\Delta\theta$, то, как видно из графика (рис. 5.30), может оказаться, что моменты на валах машины явно неодинаковы.

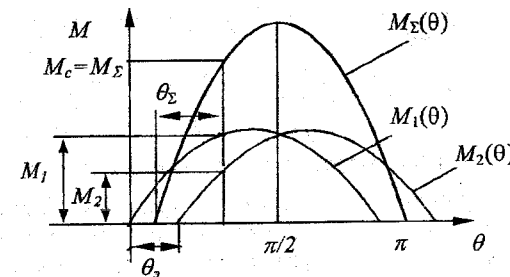


Рис. 5.30. Распределение нагрузки между двигателями при угловом рассогласовании роторов

Как видно из рис.5.31, при определенных значениях угла рассогласования $\Delta\theta$ одна из машин может оказаться в генераторном режиме.

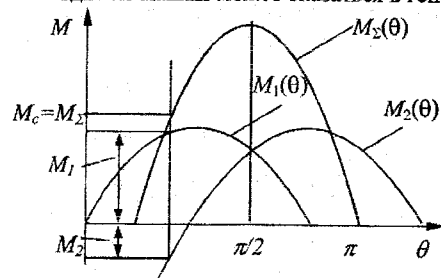


Рис. 5.31. Распределение нагрузки между двигателями при больших углах рассогласования роторов

Таким образом, для наиболее качественной работы привода рассогласование между положениями роторов машин должно быть равно нулю, чего, как правило, добиваются при наладке привода.

Выравнивание нагрузок в синхронном двухдвигательном ЭП возможно в замкнутых системах автоматического регулирования (рис. 5.32).

В качестве сигнала о величине нагрузки двигателя используют сигнал с датчиков активной мощности (P1 и P2), устанавливаемых в цепях статоров машин. Процесс выравнивания осуществляют через цепи возбуждения СД, воздействуя на их магнитные потоки. Для недогруженного двигателя сигнал обратной связи вызывает увеличение тока возбуждения. Одновременно в двигателе, который имеет больший момент, ток возбуждения снижается.

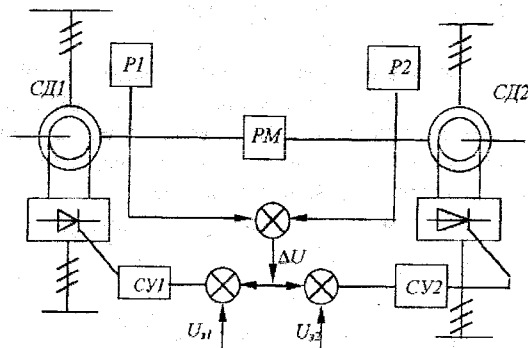


Рис. 5.32. Выравнивание нагрузок в синхронном двухдвигательном ЭП

Возможны варианты систем выравнивания, с контролем активных составляющих статорных токов. В отличие от рассмотренного ранее варианта, здесь не возможна перегрузка одного из двигателей по току статора.

Глава 6

Электропривод по системе “электрический вал”

6.1. Общие положения

В современных установках ЭП часто требуется, чтобы два или большее неодинаково нагруженных двигателей, приводящих во вращение различные валы рабочей машины (иногда к тому же достаточно удаленные друг от друга), вращались с одинаковыми, или строго пропорциональными скоростями, или чтобы валы их поворачивались на одинаковые или пропорциональные углы. Другими словами, целый ряд производственных механизмов или агрегатов нуждается в обеспечении синхронного или синфазного вращения отдельных его элементов при различной их загрузке.

Например, в таких механизмах гидротехнических сооружений, как шлюзы или разводные мосты, где величины пролетов, перекрываемые затворами или щитами шлюза велики, из-за сложности прокладки соединительного вала как в подводной, так и надводной части камеры затруднительно применение систем однодвигательных ЭП ввиду необходимости усложнения кинематических передач, их большой протяженности, а, следовательно, снижения надежности и производительности. Поэтому в подобных случаях во избежание перекосов и больших механических напряжений в конструкции затвора при сохранении одинакового закона движения для обеих сторон щита устанавливают самостоятельные двигатели на каждой из лебедок, а выполнение требования синхронности их работы обеспечивают благодаря специальному их включению в схему “электрического вала”.

В разводных мостах, например, пролетное строение поднимают двумя и более лебедками, установленными по обеим сторонам пролета. При этом весьма важным является синхронное движение обеих половин разводной части моста для правильного закрывания замкового устройства. В этом случае также целесообразно использовать систему ЭП синхронного вращения, т.е. электрический вал.

В металлургической промышленности электрический вал применяют в летучих ножницах, в приводе подачи тележек в обжигные печи, где для подачи в печь лист приходится размещать сразу на нескольких тележках. В мощных порталных кранах, имеющих большие расстояния между опорами избежать перекоса последних невозможно из-за неодинаковых нагрузок в различных частях мостовой части крана. В этом случае также возможно применение выше названной системы многодвигательного ЭП.

В настоящее время система ЭП “электрический вал” широко применяется в механизмах ряда отраслей промышленности и народного хозяйства: в мощных транспортерах, современных металлорежущих станках,

в текстильной промышленности, в полиграфической промышленности, в судостроении.

Электрический вал (ЭВ) - это система ЭП, в структуру которой входят несколько двигателей, связанных электрически и работающих на самостоятельные производственные машины, или их органы и обеспечивающие согласованное, синхронное вращение последних.

6.2. Классификация электроприводов по системе "электрический вал"

Эти системы могут быть реализованы как на основе машин постоянного тока, так и машин переменного тока. Системы на постоянном токе используются крайне редко, поэтому здесь не рассматриваются.

Существующие системы электрического вала на переменном токе представлены двумя основными группами:

- системы, в которых синхронное вращение осуществляется непосредственно основными приводными двигателями (без вспомогательных уравнильных двигателей) - *рабочий электрический вал*.
- системы со вспомогательными уравнильными машинами - *электрический вал с уравнильными машинами*;

Системы рабочего электрического вала более просты в конструктивном исполнении, имеют меньшую стоимость, чем системы с уравнильными машинами, однако, их возможности несколько ограничены, и недостатки существенны. По этой причине рабочий электрический вал получил меньшее распространение по сравнению с уравнильным электрическим валом.

В схему рабочего электрического вала (рис.6.1) входят два механически не связанных между собой асинхронных двигателя АД1 и АД2, приводящих во вращение нагрузки Н1 и Н2. Статорные обмотки машин включены параллельно на питающую сеть, а кольца роторов обеих машин включены параллельно на общий реостат.

Двигатели АД1 и АД2 выполняют одновременно функции рабочих двигателей и уравнильных машин. Если нагрузки не одинаковы или отличаются параметры электрических машин, в роторных цепях возникает уравнильный ток за счет уравнильной э.д.с., имеющей ту же природу, что и в схеме двухдвигательного электропривода с параллельным включением сопротивления на роторную цепь.

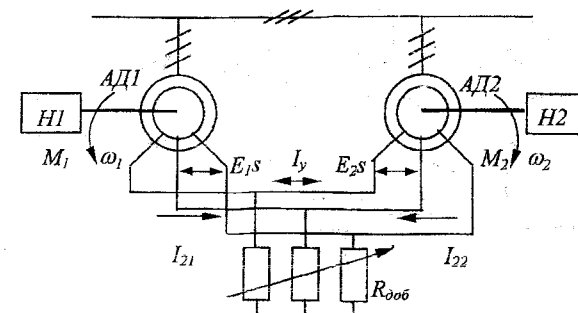


Рис. 6.1. Рабочий электрический вал

В уравнильном электрическом вале, кроме главных приводных двигателей, в качестве которых могут быть использованы машины как постоянного, так и переменного тока, на одном валу с ними устанавливаются уравнильные машины У1 и У2, называемые синхронизаторами или силовыми сельсинами. В качестве уравнивателей могут быть использованы как синхронные, так и асинхронные машины (рис. 6.2 и рис. 6.3):

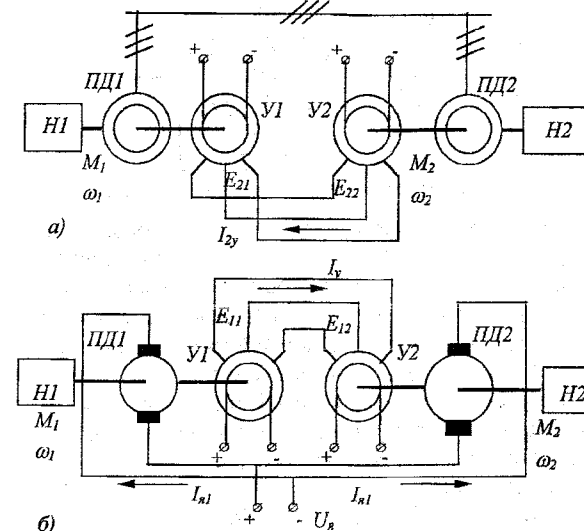


Рис. 6.2. Электрический вал с синхронными уравнильными машинами: а) - на базе асинхронных двигателей; б) - на базе двигателей постоянного тока

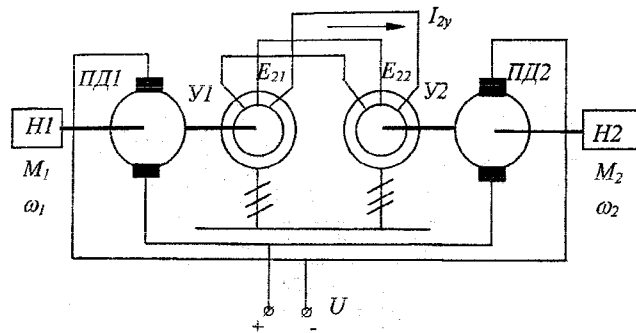


Рис. 6.3. Электрический вал с асинхронными уравнивающими машинами

Промежуточный электрический вал представляет собой систему, у которой на валу одной рабочей машины $H1$ устанавливается приводной двигатель $Д1$ и уравнивающая машина $У1$, а на валу второй рабочей машины установлена вторая уравнивающая машина $У2$, выполняющая одновременно функции приводного двигателя (рис. 6.4).

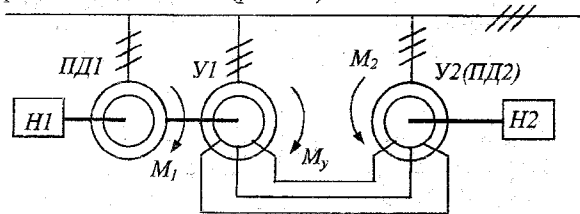


Рис.6.4. Промежуточный электрический вал

ЭП по схеме рабочего электрического вала целесообразно применять в установках, требующих синхронизации вращения на периоды пуска и остановки, а также при работе в стационарных режимах со скоростью не выше $2/3\omega_0$, т.к. синхронизирующий момент в этой схеме резко падает при скоростях выше указанной. Кроме того, в такой системе недопустимо резкое изменение нагрузки на валах приводных двигателей.

В других случаях, при наличии колеблющейся в широких пределах нагрузки и необходимости регулирования скорости привода, более надежной системой синхронного вращения может служить электрический вал с уравнивающими машинами.

Работа электрического вала по любой из схем может быть проанализирована с помощью векторных диаграмм, на основе которых становится очевиден принцип действия электрического вала и могут быть установлены аналитические зависимости. Рассмотрим более подробно работу электрического вала в различных схемах.

6.3. Уравнильный электрический вал с синхронными вспомогательными машинами

Структурная схема электрического вала имеет вид, приведенный на рис. 6.5.

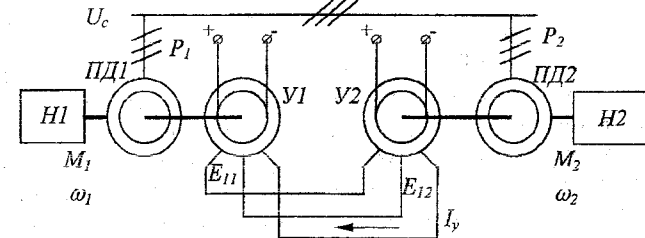


Рис.6.5. Уравнильный электрический вал с синхронными вспомогательными машинами

Параметры уравнивателей $У1$ и $У2$ одинаковы и их статорные обмотки соединены между собой. При строго одинаковых механических характеристиках приводных двигателей $ПД1$ и $ПД2$ и наличии на их валах одинаковых нагрузок оба вала будут вращаться с одинаковой скоростью и соответственно с одинаковой скоростью синфазно будут вращаться роторы уравнивателей $У1$ и $У2$. Наводимые в статорах $У1$ и $У2$ э.д.с. будут равны по величине и сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол 180° эл.град. При этом ток в цепи статоров отсутствует. При изменении нагрузки на валу хотя бы одного из приводных двигателей произойдет взаимное смещение роторов $ПД1$ и $ПД2$, а также роторов $У1$ и $У2$.

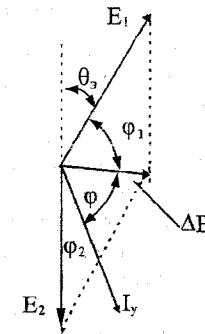


Рис. 6.6. Векторная диаграмма для иллюстрации работы вспомогательных машин

Как показано на векторной диаграмме (рис.6.6), при неравенстве нагрузок на валах приводных двигателей в цепях статоров имеет место фазовый сдвиг между э.д.с. E_1 и E_2 на некоторый угол θ (например, если

возросла нагрузка $H1$, то ротор ПД1 и У1 сместится относительно ПД2 и У2 в сторону отставания на угол ϕ , что определит фазовый сдвиг фаз между э.д.с. E_1 и E_2 $\pi + \theta = p \cdot \phi$ эл.град., где p - число пар полюсов в уравнильнике.

В результате в цепи статоров появится некоторая результирующая э.д.с. - ΔE , что обусловит, в свою очередь, возникновение уравнительного тока I_y в цепи статоров У1 и У2. Так как сопротивление цепи статоров, в основном, индуктивное, то вектор этого тока отстает от вектора вызвавшей его э.д.с. (ΔE) на угол ϕ близкий 90° . Относительно E_1 вектор I_y , как видно из диаграммы, повернут на угол $\phi_1 \approx 180$ эл.град. ($\phi_1 > 90$ эл.град.).

Следовательно, для вспомогательной машины У1 уравнительный ток будет источником двигательного уравнительного момента, а двигатель У1 будет работать в двигательном режиме, помогая приводному двигателю ПД1 преодолевать возросшую нагрузку. Векторы E_2 и I_y , напротив, составят угол $\phi_2 < 90$ эл.град., что соответствует работе машины У2 в режиме генератора.

На рис. 6.7. стрелками показано перераспределение мощности между двигателями системы.

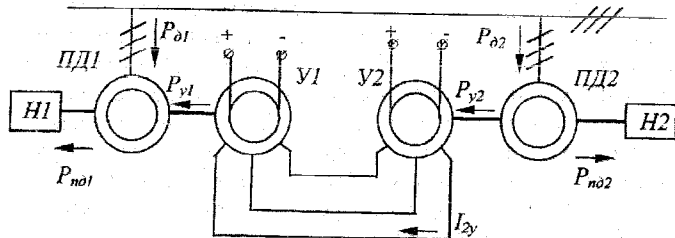


Рис. 6.7. Перераспределение мощности между двигателями ЭВ

Таким образом, за счет возникающих при рассогласовании роторов уравнительных токов и моментов система будет удерживать синхронность вращения машин благодаря тому, что к машине с большей нагрузкой будет подводиться дополнительная мощность со стороны уравнильника, что приведет к увеличению скорости вращения, а от машины с меньшей нагрузкой часть мощности будет отводиться к уравнильнику, т.е. скорость этой машины несколько снизится. Баланс наступит при условии, что скорости станут вновь одинаковыми, хотя уже и другими по величине.

Если пренебречь потерями в меди статоров, то не трудно видеть, что уравнительные моменты должны быть равны полуразности статических моментов M_{c1} и M_{c2} на валах приводных двигателей:

$$\begin{aligned} M_{d1} &= M_{c1} - M_{yp}; \\ M_{d2} &= M_{c2} + M_{yp}. \end{aligned} \quad (6.1)$$

Так как оба двигателя вращаются с одинаковой скоростью и имеют одинаковые параметры, то $M_{d1} = M_{d2}$, откуда

$$M_{yp} = \frac{M_{c1} - M_{c2}}{2}. \quad (6.2)$$

Мощность уравнильников выбирается из условия:

$$P_{y1} = P_{y2} = \frac{P_{n1} - P_{n2}}{2}, \quad (6.3)$$

а мощность приводных двигателей ПД1 и ПД2 - из условия:

$$M_{d1} = M_{d2} = \frac{M_{c1} - M_{c2}}{2}.$$

Рассмотренная выше схема электрического вала имеет несколько существенных недостатков:

- при достаточно большой разности статических моментов угол рассогласования возрастает и может оказаться больше предельно допустимого (предельно допустимый угол равен 90 эл.град.), в результате чего система выпадает из синхронного режима;

- при снижении скорости происходит уменьшение синхронизирующих (уравнительных) моментов, так как э.д.с. уравнильников, в качестве которых выступают синхронные двигатели, пропорциональна току возбуждения и скорости вращения. В результате, при работе на малых скоростях уравнительные токи и соответствующие им уравнительные моменты могут оказаться недостаточными для удержания системы в синхронном режиме;

- при пуске, когда скорость вращения равна нулю ($\omega = 0$), уравнительные токи и соответствующие им уравнительные моменты также равны нулю. В то же время неравенство статических моментов наиболее вероятно именно в момент пуска. Таким образом, в режиме пуска электрический вал оказывается вообще неработоспособным, и оси механизмов могут сместиться на большие углы, что делает электрический вал с синхронными уравнильниками непригодным в установках, где синхронность вращения при пуске важна;

- недостатком системы является сравнительно высокая стоимость (из-за высокой стоимости синхронных машин) и необходимость в источниках питания постоянного тока для обмоток возбуждения синхронных двигателей.

Рассмотрим пример, поясняющий принцип работы электрического вала с синхронными уравнильниками.

Дано: $P_{n1} = 100$ кВт; $P_{n2} = 50$ кВт; $\omega = 100$ рад/сек

Определить: P_{y1} и P_{y2} ; режимы работы У1 и У2; P_{cd1} и P_{cd2} .

Решение выполняется в соответствии приведенным зависимостям. Результаты анализа:

$$\begin{aligned} P_{y1} &= P_{y2} = (P_{n1} - P_{n2})/2 = 25 \text{ кВт}; \\ P_{cd1} &= P_{cd2} = (P_{n1} + P_{n2})/2 = 75 \text{ кВт}; \end{aligned}$$

Машина Y_1 работает двигателем а Y_2 работает генератором;
 $M_{y1} = M_{y2} = 250 \text{ Нм}$.

Схема мощностей электрического вала и соответствующая диаграмма преобразования мощности приведены на рисунке 6.8, а,б.

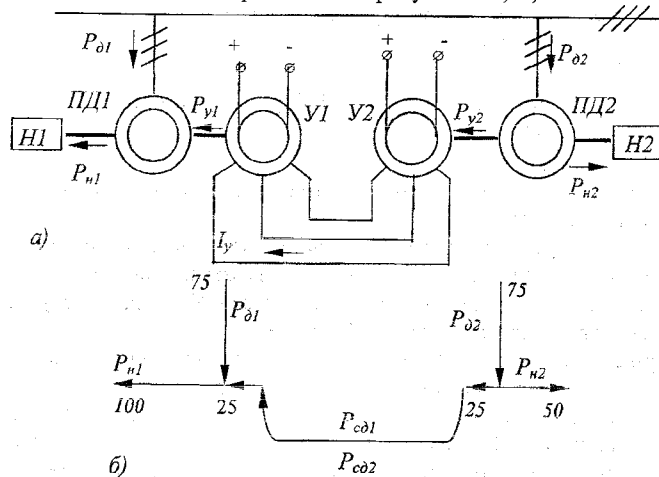


Рис. 6.8. Схема электрического вала и диаграмма преобразования мощности поясняющая пример

6.4. Уравнительный электрический вал с асинхронными вспомогательными машинами

Эта схема электрического вала наиболее широко используется среди всех многодвигательных ЭП по системе электрического вала. Структурная схема такой системы имеет следующий вид (рис. 6.9):

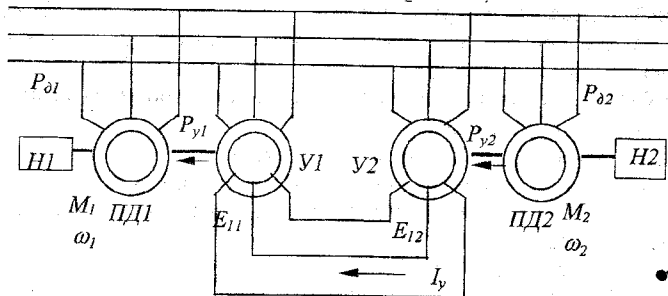


Рис. 6.9. Электрический вал с асинхронными уравнителями

При одинаковых нагрузках на валах приводных двигателей ПД1 и ПД2 и при идентичности их характеристик роторы их будут вращаться синхронно. При этом э.д.с. вспомогательных машин Y_1 и Y_2 будут равны по величине и находиться в противофазе. Следовательно, ток в общей роторной цепи Y_1 и Y_2 отсутствует, а в статорных обмотках будут протекать только намагничивающие токи.

Если нагрузка на одном из валов приводных двигателей изменится (например, $M_{c2} > M_{c1}$), то вал ПД2 уже будет отставать от вала ПД1 на некоторый угол θ (рис. 6.10).

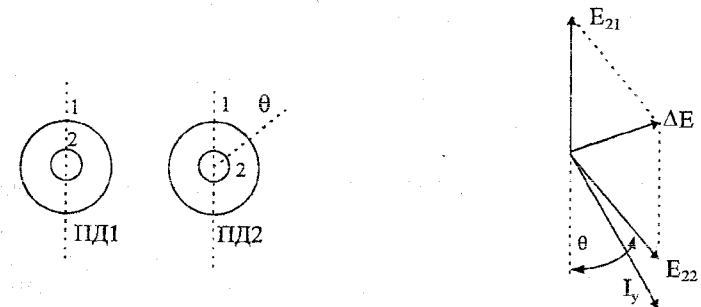


Рис. 6.10. Векторная диаграмма для иллюстрации работы вспомогательных асинхронных машин, включенных по полку

Соответственно, будет иметь место и сдвиг роторных э.д.с. вспомогательных машин (причем э.д.с. ротора уравнителя Y_2 уже опережает э.д.с. уравнителя Y_1 на угол θ). В результате во вторичной цепи вспомогательных машин Y_1 и Y_2 появится уравнительный ток I_y . Взаимодействуя с полем статора, уравнительный ток вызовет появление уравнительных моментов во вспомогательных машинах Y_1 и Y_2 , которые будут соответственно двигательным для вспомогательной машины Y_2 и генераторным - для вспомогательной машины Y_1 .

Моменты вспомогательных машин являются функциями скольжения и угла рассогласования θ ; они могут быть определены в соответствии со следующими зависимостями:

$$M_{ам1} = \frac{M_k}{\frac{s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s}} \left[(1 - \cos \theta) - \frac{s}{s_{kp}} \sin \theta \right];$$

$$M_{ам2} = \frac{M_k}{\frac{s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s}} \left[(1 - \cos \theta) + \frac{s}{s_{kp}} \sin \theta \right], \quad (6.4)$$

где M_k , s_{kp} - соответственно, значения критического момента и критического скольжения вспомогательной машины в нормальной схеме

включения; S - скольжение вспомогательной машины в схеме уравнительного вала; θ - угол рассогласования валов.

В пределах изменения угла $0^\circ < \theta < 90^\circ$ для любых положительных скольжений s больше нуля момент $M_{вм2} > 0$, а момент $M_{вм1}$ может быть как положительным, так и отрицательным. Графики моментов уравнивателей $BM1$ и $BM2$ для скольжений $s = s_{кр}$ и $s = 0.5s_{кр}$ в функции угла рассогласования θ приведены на рис. 6.11.

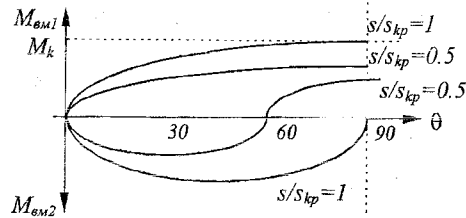


Рис. 6.11. Графики моментов уравнивателей в функции угла рассогласования

Можно доказать, что если при заданном скольжении s и угле рассогласования θ система вращается синхронно, то оба приводных двигателя при условии идентичности характеристик развивают одинаковые моменты. Следовательно можно записать следующие равенства:

$$M_{c1} = M + M_{вм1};$$

$$M_{c2} = M + M_{вм2},$$

где M - момент на валу приводного двигателя.

Отсюда уравнительный момент

$$M_{ур} = M_{c2} - M_{c1} = M_{вм2} - M_{вм1}. \quad (6.5)$$

Подставив выражения для моментов вспомогательных машин и выполнив преобразования, окончательно имеем:

$$M_{вм1} = \frac{M_k}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} \cdot \frac{2s}{s_{кр}} \sin \theta. \quad (6.6)$$

Из выражения (6.6) видно, что при работе с малыми скольжениями $M_{ур}$ весьма невелик и может не обеспечивать надежную синхронизацию системы. Поэтому в системе электрического вала со вспомогательными асинхронными машинами при включении на вращение роторов по полю синхронная скорость уравнительных машин должна быть такой, чтобы обеспечивалась их работа с достаточно большим скольжением их при любой нагрузке (т.е. она должна быть заметно выше синхронной скорости приводных двигателей).

Например, если синхронная скорость вращения приводного двигателя $n_{0,лд} = 1000$ об/мин, то вспомогательная машина должна выбираться на скорость $n_{0,ам}$ порядка 1500 об/мин и более. Тогда минимальное рабочее скольжение

$$s = \frac{n_{0,ам} - n_{0,лд}}{n_{0,ам}} = 0,33,$$

что является уже достаточным значением для создания необходимого $M_{ур}$.

В системе электрического вала со вспомогательными асинхронными машинами, включенными по полю, последние работают в режиме двойного питания. При $M_{c2} > M_{c1}$ вспомогательная машина $BM2$ работает в двигательном режиме, а $BM1$ - в генераторном. Так как при этом частота поля статора больше частоты поля ротора ($f_1 > f_2$), то потоки энергии в системе будут иметь направления показанные на рис. 6.12.

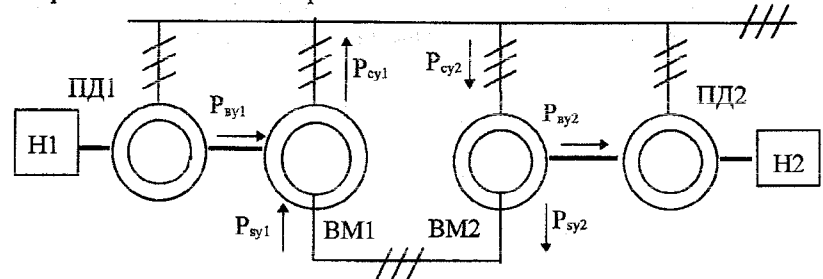


Рис. 6.12. Направление потоков энергии в системе при включении вспомогательных машин по полю

Рассмотрим пример.

Мощности нагрузок на валах приводных двигателей соответственно равны $P_{н1} = 100$ кВт и $P_{н2} = 150$ кВт; рабочее скольжение привода $s = 0.25$.

Определить значения мощностей, потребляемых из сети приводными двигателями и перераспределение мощности в контурах вспомогательных машин.

Решение примера.

$$P_{снд1} = P_{снд2} = (P_{н1} + P_{н2}) / 2 = 150 \text{ кВт};$$

$$P_{сх2} = 25 / (1 - S) = 33;$$

$$P_{сх2} = P_{сх1} S = 8 \text{ кВт};$$

$$P_{сх1} = P_{сх2} / S = -8 \text{ кВт};$$

$$P_{сх1} = -25 - 8 = -33 \text{ кВт}.$$

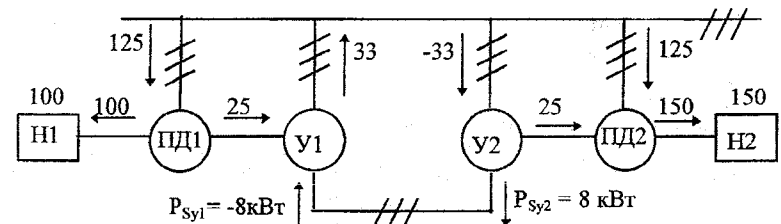


Рис. 6.13. График перераспределения мощности в системе ЭВ, рассматриваемой в примере

Из рис.6.13, рассмотренного выше, следует, что если пренебречь потерями, то при работе электрического вала энергия, потребляемая из сети вспомогательной машиной, вал которой более загружен, возвращается в сеть машиной с менее нагруженным валом.

На практике гораздо чаще применяется система электрического вала со вспомогательными асинхронными машинами при включении их на вращение против поля, что позволяет снизить габариты вспомогательных машин и получить при любом рабочем скольжении достаточный уравнивающий момент.

Для случая, когда $M_{c2} > M_{c1}$, но роторы вращаются против поля, то векторная диаграмма уже будет иметь вид показанный на рис. 6.14.

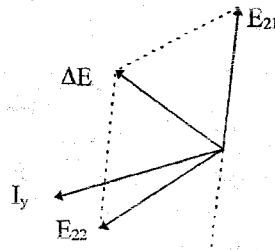


Рис. 6.14. Векторная диаграмма для иллюстрации работы вспомогательных машин, включенных против поля

В этом случае э.д.с. ротора $BM2$ отстает от э.д.с. ротора $BM1$, и выражения для моментов вспомогательных машин будут иметь вид:

$$M_{em1} = \frac{M_k}{\frac{s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s}} \left[-(1 - \cos \theta) - \frac{s}{s_{kp}} \sin \theta \right];$$

$$M_{em2} = \frac{M_k}{\frac{s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s}} \left[-(1 - \cos \theta) + \frac{s}{s_{kp}} \sin \theta \right]. \quad (6.7)$$

При синхронном вращении системы по-прежнему будут справедливы соотношения:

$$M_{c1} = M_{\pi\delta 1} + M_{em1}; \quad (6.8)$$

$$M_{c2} = M_{\pi\delta 2} + M_{em2}; \quad (6.9)$$

$$M_{\pi\delta 1} = M_{\pi\delta 2}.$$

Следовательно, уравнивающий момент

$$M_{yp} = M_{c2} - M_{c1} = M_{em2} - M_{em1} = \frac{M_k}{\frac{s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s}} \cdot \frac{2s}{s_{kp}} \sin \theta, \quad (6.10)$$

а так как при вращении против поля $s \gg s_{kp}$, то $s_{kp}/s \gg s_{kp}/s$, то

$$M_{yp} = 2M_{kp} \sin \theta. \quad (6.11)$$

Таким образом, при включении вспомогательных машин против поля уравнивающий момент уже не зависит от скольжения и может приобретать достаточно большие значения независимо от нагрузок на валах рабочих машин (рис. 6.15):

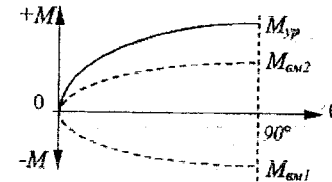


Рис.6.15. График моментов вспомогательных машин, включенных против поля в функции угла рассогласования роторов

Из уравнений для моментов вспомогательных машин при включении на вращение против поля видно, что знак момента вспомогательной машины, установленной на более нагруженном валу (в нашем примере это M_{BM2}) всегда положителен, а момент вспомогательной машины, находящейся на менее нагруженном валу (M_{BM1}) - отрицателен. Их величины являются функциями скольжения и угла рассогласования θ и изменяются почти по синусоидальному закону, достигая при $\theta = 90^\circ$ своего максимума, приблизительно равного критическому моменту M_{kp} .

Системы синхронного вращения со вспомогательными асинхронными двигателями при вращении их роторов против поля получили наибольшее распространение, так как:

- мощности $BM1$ и $BM2$ и, соответственно, их габариты меньше чем в других случаях;
- уравнивающий момент при любых скольжениях достаточно велик;
- возможна устойчивая работа при любых скольжениях.

Недостатком этих систем являются повышенные потери энергии в стали роторов вспомогательных машин, так как и в данном случае последние работают в режиме двойного питания: при этом $f_2 > f_1$ (скольжение больше единицы) и потоки энергии передаются уже через роторные цепи (рис. 6.16).

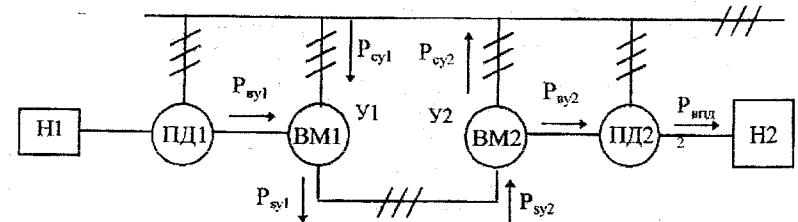


Рис. 6.16. Передача поток энергии в ЭВ при включении вспомогательных машин против поля

Рассмотрим пример.

$$P_{H1} = 100 \text{ кВт};$$

$$P_{H2} = 150 \text{ кВт};$$

$$S = 1.5.$$

Определить величины и направления потоков энергии при работе ЭВ с заданным скольжением.

$$P_{cy2} = P_{cy2}/(1-S) = 25/0.5 = -50;$$

$$P_{sy2} = -50 \cdot 1.5 = -75;$$

$$P_{cy1} = -25/(1-S) = 50;$$

$$P_{sy1} = 50 \cdot 1.5 = -75.$$

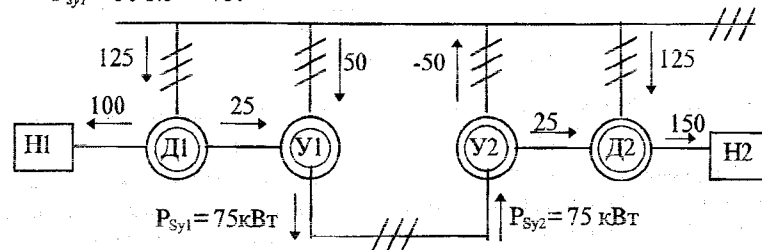


Рис. 6.17. Поток энергии в системе ЭВ для рассматриваемого примера

6.5. Рабочий электрический вал

При работе с мало отличающимися нагрузками на валах оказывается возможной синхронизация вращения механизмов посредством электрической связи роторов самих приводных двигателей (т.е. наличие в схеме электрического вала вспомогательных машин в этом случае не обязательно). При этом габариты и стоимость установки несколько меньше, что является ее достоинством.

Система электрического вала с рабочими уравнивателями представлена на рис. 6.18.

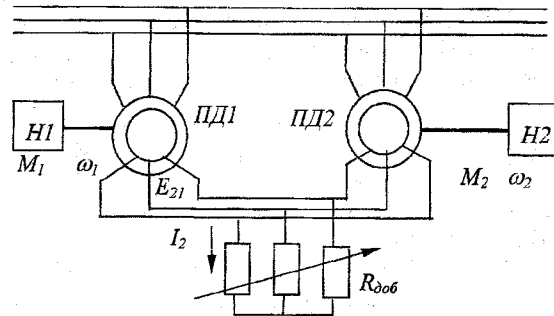


Рис. 6.18. Электрический вал с рабочими уравнивателями

В цепь роторов ПД1 и ПД2 обязательно должно быть введено добавочное активное сопротивление, включенное параллельно обмоткам и обеспечивающее скольжение (не менее 40-30%), которому соответствует достаточно большая по величине уравнивающая э.д.с. и, соответственно, уравнивающий ток и синхронизирующий момент.

Принцип действия уравнивающего вала в рассматриваемой схеме состоит в следующем. При отсутствии рассогласования в положении роторов (сдвиг между роторными э.д.с. составляет 180 эл.град.) их токи замыкаются только через рабочий реостат, причем величина тока в реостате, как видно из схемы замещения (рис. 6.19), будет равна сумме роторных токов двигателей ПД1 и ПД2, входящих в систему синхронного вращения.

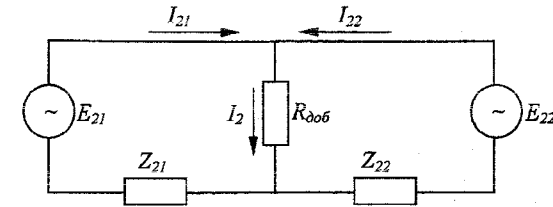


Рис. 6.19. Схема замещения для общей роторной цепи

При рассогласовании валов и неравенстве статических моментов на каждом из них возникает сдвиг между э.д.с. роторов машин (например, если $M_{c1} > M_{c2}$, то E_{21} опережает E_{22} на угол θ (рис. 6.20), в то время как вал АД1 отстает от вала АД2 на угол θ):

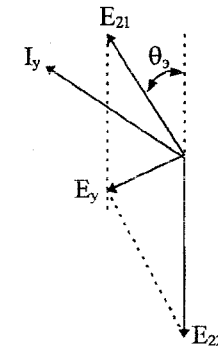


Рис. 6.20. Векторная диаграмма, иллюстрирующая работу рабочих уравнивателей

В результате в цепи роторов наводится уравнивающая э.д.с. и возникает уравнивающий ток, протекающего только через обмотки роторов, минуя рабочий реостат:

$$I_y = (2E_{21} \cdot \sin(\theta/2)) / 2Z_{рот} = E_y / 2Z_{рот}, \quad (6.12)$$

где $Z_{рот}$ - сопротивление роторной обмотки.

При этом на валу двигателя с большей нагрузкой создается дополнительный уравнительный момент положительного знака:

$$M_{уАД1} = c \cdot \Phi \cdot I_y \cdot \cos \varphi_{21}, \quad (6.13)$$

а на валу менее загруженного двигателя - такой же по величине тормозной момент:

$$M_{уАД2} = c \cdot \Phi \cdot I_y \cdot \cos \varphi_{22}. \quad (6.14)$$

Так как при одинаковой скорости вращения рабочие моменты двигателей также одинаковы, то справедливы следующие равенства:

$$M_{c1} = M_\delta + M_{урАД1};$$

$$M_{c2} = M_\delta - M_{урАД2};$$

$$M_{c1} - M_{c2} = 2M_{ур}.$$

откуда

$$M_{ур} = (M_{c1} - M_{c2}) / 2; \quad (6.15)$$

$$M_\delta = (M_{c1} + M_{c2}) / 2. \quad (6.16)$$

Недостатками рассмотренной схемы являются:

- значительное увеличение потерь в установке за счет постоянно введенного добавочного сопротивления в цепи роторов;
- ограниченный диапазон расхождения мощностей нагрузок (величина уравнительного момента в такой системе зависит как от угла θ , так и от величины добавочного сопротивления).

Глава 7

Выбор электрических двигателей систем электропривода

7.1. Основные критерии для выбора электрических двигателей

Основным звеном любой системы ЭП является электрический двигатель, обеспечивающий работу исполнительного механизма (или рабочей машины) в соответствии с технологическими требованиями для поддержания заданного уровня производительности, энергетических и экономических показателей.

Сформируем следующие параметры электрических двигателей учитываемых при выборе:

- номинальная мощность и скорость вращения;
- номинальное напряжение питания;
- род тока;
- вид естественной характеристики;
- возможности и особенности регулирования скорости в различных режимах;
- характер и длительность переходных процессов;
- конструктивное исполнение;
- соответствие условиям окружающей среды.

Например, наиболее простыми по устройству, обслуживанию и надежности являются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (малые габариты, низкая стоимость, возможность питания непосредственно от сети переменного тока, большой диапазон по мощности), однако эти двигатели не обеспечивают глубокого регулирования скорости, неэкономичны при использовании в установках, работающих в повторно-кратковременном режиме или с широким диапазоном изменения нагрузки. Частично эти недостатки компенсируются применением двигателей с фазным ротором, для которых при использовании реостатов в роторной цепи становятся реальной возможность ограничения пусковых токов при сохранении нагрузочной способности, уменьшение потерь при частых пусках и т.д. Однако АД с фазным ротором при обычной схеме включения не позволяют получить достаточно жесткие рабочие характеристики при пониженных скоростях, вследствие чего приходится прибегать к специальным схемам включения, что ведет к удорожанию и усложнению системы ЭП, снижению энергетических показателей.

Для получения широкого диапазона регулирования скорости и момента, обеспечения плавного пуска и торможения ЭП, большой жесткости характеристик и д.р. более приемлемыми свойствами и характеристиками обладают двигатели постоянного тока.

Приведенные примеры указывают на необходимость при выборе двигателя всестороннего учета его возможностей и соответствия его свойств предъявленным требованиям со стороны технологического процесса.

В соответствии с перечисленными характеристиками для электрических двигателей приняты следующие стандартные классификации:

По напряжению:

- АД малой и средней мощности 220/127 380/220 660 В;
- АД и СД большой мощности 3000; 6000; 10000 В;
- ДПТ - 110; 220; 440 ; 650; 850; 1130 В.

По конструктивному исполнению:

- двигатели с горизонтальным расположением вала;
- двигатели с вертикальным расположением вала;
- встраиваемые двигатели.

По защите от окружающей среды

- | | |
|----------------------|--|
| открытые - | не имеющие защитных приспособлений, препятствующих соприкосновению с токоведущими частями и попаданию извне посторонних предметов; |
| защищенные - | имеющие защитные приспособления в виде сеток или коробов; |
| каплезащитные - | имеющие защитные устройства, предохраняющие от попадания капель влаги (от вертикально падающих, до под углом 60 градусов); |
| брызгозащищенные - | защита от брызг любого направления; |
| закрытые двигатели - | кроме указанных выше защит они герметично защищены от пыли, влаги и газов. |
| взрывозащищенные - | кожух такого двигателя выдерживает взрыв внутри; |
| специализированные - | тропического, холодостойкого, влагостойкого исполнения. |

Наиболее важным фактором, учитываемым при выборе двигателя, является его номинальная мощность. Соответствие мощности выбранного двигателя мощности нагрузки на его валу обеспечивает наиболее полное его использование в производственном процессе. Если двигатель выбран с завышенной мощностью, то он недоиспользуется, вследствие чего снижаются энергетические и технико-экономические показатели привода (КПД, $\cos \phi$). Если, наоборот, нагрузка на валу двигателя выше его номинальной мощности, это приводит к росту тока в его обмотках, увеличению потерь (т.е. снижению энергетических показателей). Кроме того, такая машина имеет повышенный нагрев, что приводит к снижению электрической прочности изоляции, создает предпосылки возникновения аварийных режимов работы двигателя и его полного выхода из строя. Поэтому нагрев двигателя служит одним из наиболее важных параметров для расчета и выбора мощности.

7.2. Нагрев и охлаждение двигателей

Преобразование энергии в двигателе во время работы под нагрузкой сопровождается потерями, которые можно разделить на постоянные (потери в стали, вентиляционные, на трение) и переменные (нагрев обмоток):

$$\Delta P_{\Sigma H} = k + v_n, \quad (7.1)$$

где k - постоянные потери; v_n - переменные потери при работе с номинальной нагрузкой.

Исследование процессов нагрева (или охлаждения) двигателей возможно произвести на основе уравнения теплового баланса с учетом следующих допущений:

- двигатель рассматривают как однородное тело с бесконечно большой теплопроводностью (т.е. все части двигателя имеют одинаковую температуру);
- теплоотдача двигателя в окружающую среду пропорциональна первой степени разности температур двигателя и окружающей среды;
- температура окружающей среды постоянна по величине (для нее принимается стандартное значение: $t_{\text{окр. среды}} = 40^\circ \text{C}$);
- теплоемкость, теплоотдача и тепловые потери не зависят от температуры двигателя.

В этом случае уравнение теплового баланса двигателя за элементарный промежуток времени при неизменной нагрузке будет иметь вид:

$$\Delta P dt = Q dt = A \cdot \tau \cdot dt + C \cdot d\tau, \quad (7.2)$$

где Q - количество тепла, выделяемое в двигателе в единицу времени (мощность тепловых потерь), Дж/с; A - теплоотдача двигателя - количество тепла, отдаваемое двигателем в окружающую среду в единицу времени при разности $\tau = t_{\text{де}} - t_{\text{окр. ср.}}$ в 1°C , Дж/(с $\cdot^\circ \text{C}$); τ - превышение температуры двигателя $t_{\text{де}}$ над окружающей средой $t_{\text{окр. ср.}}$ $^\circ \text{C}$; C - теплоемкость двигателя - количество тепла, необходимое для нагрева двигателя на 1°C , Дж/ $^\circ \text{C}$.

Разделим обе части уравнения на $A d\tau$:

$$\tau + \frac{C}{A} \frac{d\tau}{dt} = \frac{Q}{A} = \frac{\Delta P}{A}. \quad (7.3)$$

Таким образом, процесс нагрева двигателя описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка, которое при $\Delta P = \text{const}$ имеет решение вида:

$$\tau(t) = \tau_{\text{уст}} (1 - e^{-t/T_H}) + \tau_n \cdot e^{-t/T_H}, \quad (7.4)$$

где $\tau_{\text{уст}}$ - установившееся значение превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды; τ_n - начальное значение превышения

$$T_n = \frac{C}{A}$$

Установившееся значение температуры определяется потерями мощности и теплоотдачей двигателя. Т.к. установившемуся процессу нагрева соответствует отсутствие изменения температуры ($d\tau/dt = 0$), то из (7.3) видно, что

$$\tau_{уст} = \frac{\Delta P}{A}$$

Если в выражении (7.4) $\tau_n = 0$, что соответствует $t_{де} = t_{окр. ср.}$ на момент начала работы, то уравнение нагрева двигателя будет иметь вид:

$$\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-t/T_n}). \quad (7.5)$$

Уравнения (7.4) и (7.5) могут использоваться для определения превышения температуры двигателя как при увеличении, так и при уменьшении нагрузки. Время изменения превышения температуры от начального до установившегося значения теоретически равно бесконечности. Практически процесс нагрева можно считать законченным, когда превышение $t_{де}$ составляет $(0,95 \div 0,98) \tau_{уст}$, что соответствует $t_{уст} = (3 \div 4) T_n$.

На рис. 7.1 и 7.2 приведены кривые нагрева и охлаждения двигателя для различных начальных условий:

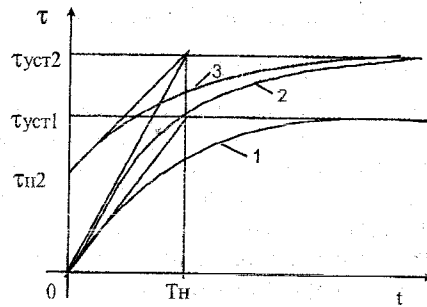


Рис. 7.1. Кривые нагрева двигателя для различных начальных условий:

$$1 - \begin{cases} Q = Q_1 = \text{const} \\ \tau_n = 0 \end{cases} \quad 2 - \begin{cases} Q = Q_2 = \text{const} \\ \tau_n = 0 \end{cases} \quad 3 - \begin{cases} Q = Q_1 = \text{const} \\ \tau_n = \tau_{н2} \end{cases}$$

В действительности кривая нагрева отличается от экспоненты, т.к. в начале процесса повышение температуры двигателя происходит быстрее, чем по теоретической кривой, а начиная с $\tau = (0,5 \div 0,6) T_n$ процесс соответствует теоретической кривой (это следует учитывать при графическом определении T_n).

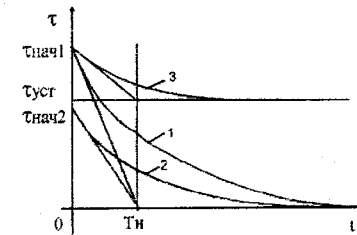


Рис. 7.2. Кривые охлаждения двигателя для различных начальных условий: 1 - кривая охлаждения двигателя при снятии нагрузки, которой соответствует количество выделенного тепла $Q = Q_1$; 2 - кривая охлаждения двигателя при снятии нагрузки, которой соответствует количество выделенного тепла $Q = Q_2$; 3 - кривая охлаждения при уменьшении нагрузки на двигатель.

В целом, процессы нагрева и охлаждения двигателей протекают сравнительно медленно (например, для открытых самовентилируемых двигателей $T_n \approx 1$ час, для закрытых - $3 \div 4$ часа). Как правило, $T_{охл} > T_n$, т.к. при остановке двигателя его теплоотдача снижается за счет прекращения вентиляции.

При изменяющейся во времени нагрузке процессу нагрева двигателя будут соответствовать различные графики $\tau(t)$ на отдельных участках работы. При переменной нагрузке температура двигателя непрерывно изменяется и на отдельных участках работы двигателя графики $\tau(t)$ будут иметь различный вид (рис. 7.3):

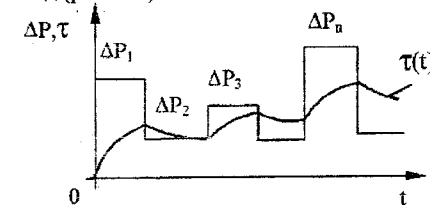


Рис. 7.3. График нагрева двигателя при изменении нагрузки

Допустимый нагрев двигателей определяется классом изоляции, применяемой в обмотках: А, Е, В, F, H, С, которому соответствуют предельно допустимые температуры от 105°C до 175°C по отношению к окружающей среде. При правильном выборе по условиям нагрева двигателя должно обеспечиваться

$$\tau_{max} \leq \tau_{доп} \quad (7.6)$$

где $\tau_{доп}$ - допустимое превышение температуры в соответствии с классом изоляции.

7.3. Нагрузочные диаграммы и режимы работы электродвигателей

В общем случае нагрузка на валу двигателя в процессе его работы может быть как постоянной, так и изменяться по величине и продолжительности воздействия. Характер изменения нагрузки во времени может быть отражен с помощью нагрузочных диаграмм, представляющих собой зависимости тока, момента или мощности в функции времени ($I(t)$, $M(t)$ или $P(t)$). Принято различать нагрузочные диаграммы двигателя и механизма.

Нагрузочной диаграммой механизма ($M_c(t)$ или $P_c(t)$) называют зависимость, отражающую изменение статического момента, тока или мощности во времени.

Нагрузочной диаграммой двигателя соответственно называют зависимость тока, момента или мощности двигателя ($I_{дв}(t)$, $M_{дв}(t)$ или $P_{дв}(t)$) функции времени.

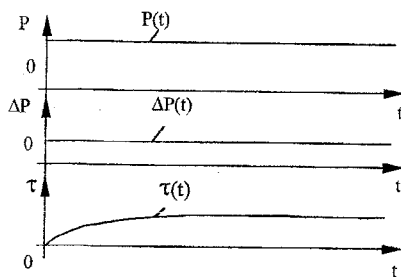
Для двигателя нагрузочные диаграммы представляют собой более сложные зависимости, чем для механизма, т.к. отражают не только статический режим его работы, но и работу в переходных режимах, например,

$$M_{дв}(t) = M_c(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt}.$$

Поэтому при расчете нагрузочных диаграмм следует учитывать как характер изменения статического момента нагрузки, так и законы протекания переходных процессов в двигателе.

В соответствии с характером изменения нагрузки на валу принимается следующая классификация режимов работы двигателя (с условным обозначением последних от S1 до S8):

S1 - *продолжительный номинальный режим работы* - это режим при неизменной нагрузке в течение такого времени, за которое превышение температуры двигателя над окружающей средой достигает установившегося значения (рис. 7.4):



S2 - *кратковременный номинальный режим работы* - режим, при котором периоды работы с номинальной нагрузкой чередуются с периодами отключения двигателя; при этом во время работы превышение температуры двигателя не достигает установившегося значения, а во время пауз машина успевает остыть до температуры окружающей среды.

Режим характеризуется *продолжительностью рабочего периода*, для которой принимаются следующие стандартные значения: 10, 30, 60, 90 мин. (рис. 7.5):

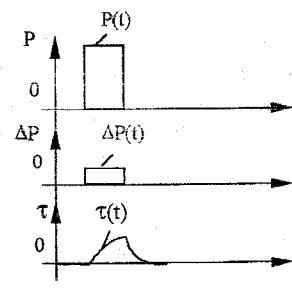


Рис. 7.5. График мощности, мощности потерь и нагрева двигателя в кратковременном режиме работы

S3 - *повторно-кратковременный режим* - при котором кратковременные периоды работы с неизменной номинальной нагрузкой чередуются с периодами отключения (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышение температуры могло достичь установившихся значений (рис. 7.6):

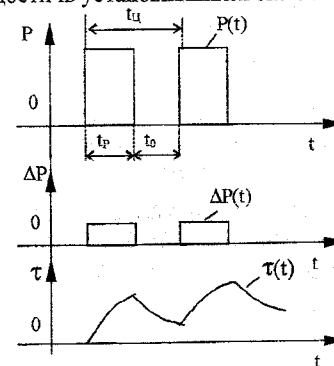


Рис. 7.6. График мощности, мощности потерь и нагрева двигателя в повторно-кратковременном режиме работы

В этом режиме продолжительность цикла не превышает 10 мин. Режим характеризуется относительной продолжительностью включения, выражаемой в процентах:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\%, \quad (7.7)$$

где t_p - время работы двигателя; t_0 - время паузы; $t_{\text{ц}}$ - время цикла ($t_{\text{ц}} = t_p + t_0$).

Для ПВ% приняты следующие стандартные значения: 15; 25; 40; 60 %. Пусковые потери в этом режиме практически не оказывают влияния на превышение температуры частей машины.

S4 - Повторно-кратковременный номинальный режим с частыми пусками - режим, при котором периоды пуска и кратковременной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения двигателя, причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, что бы превышение температуры двигателя могло достигнуть установившегося значения (рис. 7.7):

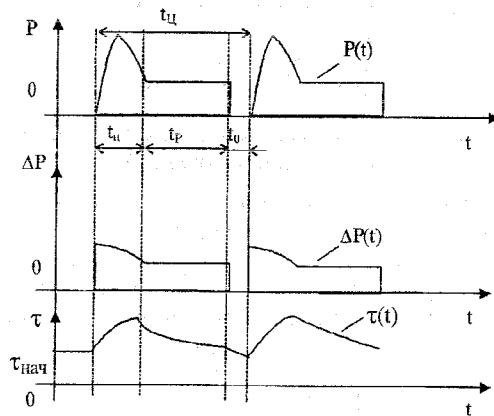


Рис. 7.7. График мощности, мощности потерь и нагрева двигателя в повторно-кратковременном номинальном режиме работы с частыми пусками

В этом режиме пусковые потери оказывают существенное влияние на превышение температуры двигателя. Относительная продолжительность включения для указанного режима определяется следующим образом:

$$ПВ\% = \frac{t_n + t_p}{t_n + t_p + t_0} \cdot 100\%, \quad (7.8)$$

где t_n - время пуска.

Нормируемые значения ПВ%: 15; 25; 40; 60 %. Нормируемое число пусков в час: 30; 60; 120; 240.

S5 - Повторно-кратковременный номинальный режим работы с частыми пусками и электрическим торможением - при котором периоды пуска, кратковременной неизменной номинальной нагрузки и электрического

торможения чередуются с периодами отключения машины, причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышение температуры частей машины могло достигнуть установившихся значений (рис. 7.8).

В этом режиме потери пусковые и электрического торможения оказывают существенное влияние на превышение температуры. Этот режим характеризуется относительной продолжительностью включения и числом пусков в час:

$$ПВ = \frac{t_n + t_p + t_m}{t_n + t_p + t_m + t_0} \cdot 100\%, \quad (7.9)$$

где t_m - время торможения.

Нормированные значения ПВ и числа пусков в час такие же, как и в режиме S4.

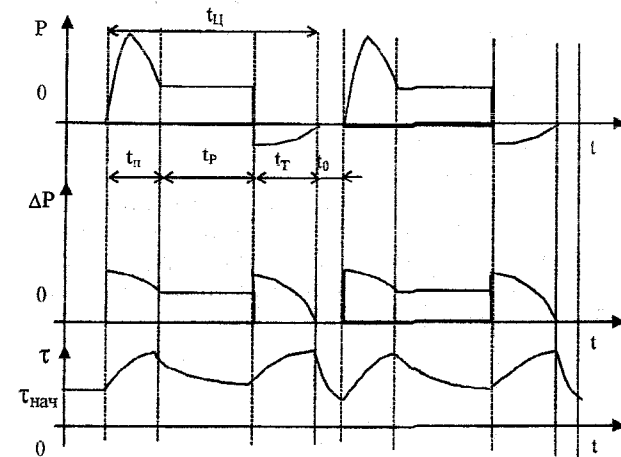


Рис. 7.8. График мощности, мощности потерь и нагрева двигателя при работе в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками и электрическим торможением

S6 - Переключающийся номинальный режим работы - режим, при котором кратковременные периоды с неизменной номинальной нагрузкой (рабочие периоды) чередуются с периодами холостого хода, во время которых двигатель не отключается, причем как рабочие периоды, так и периоды холостого хода не настолько длительны, чтобы превышение температуры двигателя могло достигнуть установившегося значения. Продолжительность одного цикла не должна превышать 10 минут (рис. 7.9):

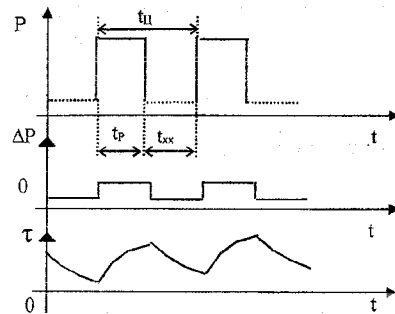


Рис. 7.9. График мощности, мощности потерь и нагрева двигателя в перемежающемся режиме работы

Относительная продолжительность нагрузки, %:

$$ПН = \frac{t_p}{t_p + t_{х.х.}} \cdot 100, \quad (7.10)$$

где $t_{х.х.}$ - время холостого хода.

Нормируемые значения ПН = 15, 25, 40, 60 %.

S7 - *перемежающийся номинальный режим работы с частыми реверсами* - режим, при котором периоды реверса чередуются с периодами неизменной номинальной нагрузки, причем периоды последней не настолько длительны, чтобы превышение температуры двигателя могло достичь установившегося значения (рис. 7.10).

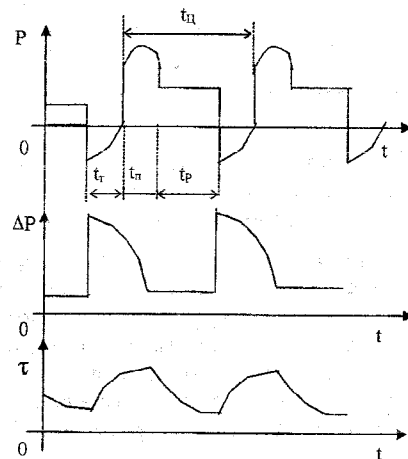


Рис. 7.10. График мощности, мощности потерь и нагрева двигателя в перемежающемся режиме работы с частыми реверсами

В этом режиме потери при реверсе оказывают существенное влияние на превышение температуры двигателя, который работает без остановки, находясь постоянно под напряжением.

Данный режим характеризуется числом реверсов в час (30, 60, 120 и 240).

S8 - *Перемежающийся (циклический) номинальный режим работы с двумя или более угловыми скоростями* - это режим, при котором периоды работы с одной нагрузкой на одной угловой скорости чередуются с периодами работы на другой угловой скорости с другой нагрузкой. Периоды нагрузки на каждой из угловых скоростей не настолько длительны, чтобы превышение температуры двигателя могло достичь установившегося значения (рис. 7.11):

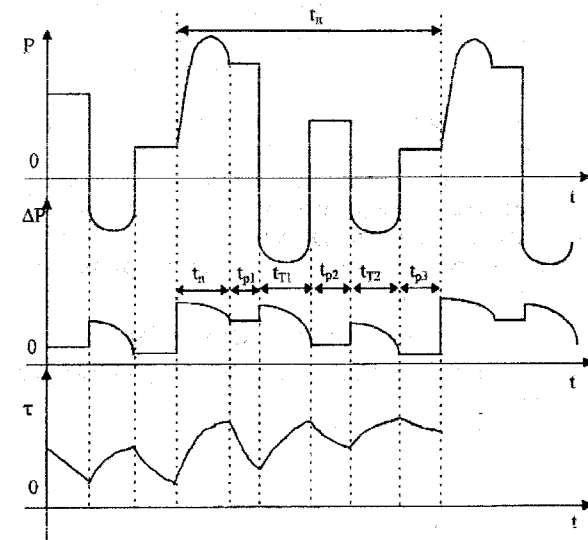


Рис. 7.11. График мощности, мощности потерь и нагрева двигателя в циклическом режиме работы

Данный режим характеризуется числом циклов в час и относительной продолжительностью нагрузки, % на отдельных ступенях.

Нормированные значения числа циклов в час: 30, 60, 120, 240.

Условия нагрева машин для рассмотренных режимов (S1-S8) различны, поэтому для каждого из них рекомендуется конкретный метод выбора двигателя по мощности. При этом, независимо от режима работы, выбор двигателя по мощности осуществляется, как правило, в три этапа:

1. предварительный выбор двигателя по каталогу на основании данных нагрузки ($P_{испр}(t)$ или $M_c(t)$);

2. проверочный расчет на нагрев (а при необходимости проверка на перегрузочную способность по моменту или току);

3. окончательный выбор двигателя по каталогу с учетом результатов проверки.

Рассмотрим методы выбора двигателя по мощности для различных режимов.

7.4. Выбор двигателя по мощности при продолжительном режиме работы

Неизменная нагрузка (режим S1)

В этом случае выбор двигателя производится непосредственно по каталогу на двигатели общепромышленных серий, которые рассчитаны на продолжительный режим работы. Выбор двигателя производят из условия:

$$P_n \geq P_c, \quad (7.11)$$

где P_c - мощность, потребляемая механизмом (мощность нагрузки).

При этом нет необходимости в проверке выбранного двигателя на нагрев. В случаях, когда механизм, являющийся нагрузкой двигателя, имеет повышенное сопротивление трения при трогании, необходима проверка на достаточность пускового момента двигателя. Т.к. в продолжительном режиме двигатель пускается редко, то пусковые потери не могут заметно сказаться на нагреве двигателя.

Переменная нагрузка (режим S8)

Для такого режима работы двигателя характерно циклическое изменение нагрузки (рис. 7.12).

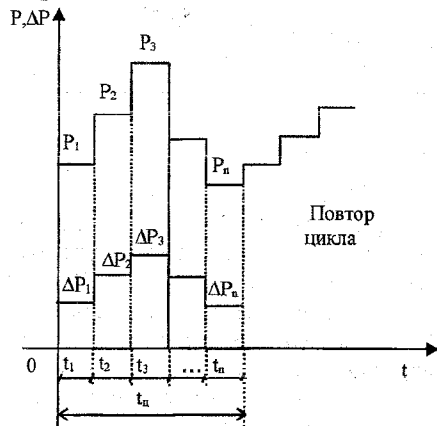


Рис. 7.12. Изменение мощности нагрузки и мощности потерь в двигателе при работе в циклическом режиме

Потери в двигателе $\Delta P_l + \Delta P_n$ изменяются также циклически, пропорционально изменению мощности нагрузки. При достаточно большом числе циклов в двигателе устанавливается некоторое среднее превышение температуры τ_{cp} .

Так как мощность нагрузки не является величиной постоянной, то в данном случае имеет смысл вначале выполнить предварительный выбор двигателя по расчетной мощности нагрузки, исходя из ее среднего значения:

$$P_{расч} = P_{ср.нагр} \cdot K_z, \quad (7.12)$$

где $P_{расч}$ - расчетное значение мощности для предварительного выбора двигателя; $P_{ср.нагр}$ - средняя мощность нагрузки:

$$P_{ср.нагр} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}, \quad (7.13)$$

где $K_z = 1.1 \div 1.3$ - коэффициент запаса, учитывающий превышение действительного значения мощности над ее средним значением.

Далее, по каталогу выбирают двигатель из условия $P_n \geq P_{расч}$ и по одной из методик, предложенных ниже, выполняют проверку двигателя на нагрев. При неудовлетворительных результатах проверки выбирают по каталогу двигатель больший по мощности.

2. 7.5. Методы проверки двигателей на нагрев

Метод средних потерь - основан на предположении, что при равенстве номинальных потерь мощности двигателя ΔP_n и средних потерь $\Delta P_{ср}$ температура двигателя не превысит допустимую:

$$\tau_{доп} \geq \tau_{уст} = \frac{\Delta P_n}{A} \approx \frac{\Delta P_{ср}}{A} \quad (7.14)$$

Проверочный расчет ведется в следующем порядке.

Рассчитывают номинальные потери для выбранного предварительно двигателя по формуле

$$\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}. \quad (7.15)$$

С помощью графика $\eta_{0.6} = f(\omega)$, приводимого в каталоге, определяют значения $\Delta P_l + \Delta P_n$, подставляя данные для расчетов в (7.15) и рассчитывают средние потери мощности в двигателе:

$$\Delta P_{ср} = \frac{\Delta P_l t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}. \quad (7.16)$$

Сравнивают значение ΔP_{cp} и ΔP_n : если $\Delta P_{cp} \leq \Delta P_n$, то двигатель выбран верно.

Если $t_{окр. ср.}$ отличается от 40° , то

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_n (\Theta_{доп} - \Theta_{окр}) / (\Theta_{доп} - 40^\circ), \quad (7.17)$$

где $\Theta_{доп}$ - допустимое значение превышения температуры двигателя; $\Theta_{окр}$ - действительное значение превышения температуры двигателя.

Этот метод достаточно точен, но весьма трудоемок и в ряде случаев имеется дефицит данных для расчетов, вследствие чего более широкое применение получили методы эквивалентного тока, эквивалентного момента, или эквивалентной мощности.

Метод эквивалентного (среднеквадратичного) тока - основан на замене действительного, изменяющегося тока двигателя при переменной нагрузке, эквивалентным током, неизменным по величине, который вызывает в двигателе такие же потери, что и действительный ток. При этом считают не зависящими от нагрузки постоянные потери $\Delta P_{пост}$ и практически неизменным активное сопротивление обмоток.

Тогда величина средних потерь в двигателе (например, в двигателе постоянного тока) определяется по формуле:

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_{пост} + I_3^2 R, \quad (7.18)$$

где I_3 - эквивалентный расчетный ток.

Подставив (7.18) в (7.17) и выполнив преобразования, получим

$$\Delta P_{пост} + I_3^2 R = \frac{(\Delta P_{пост1} + I_1^2 R t_1 + \dots + (\Delta P_{постn} + I_n^2 R t_n))}{t_1 + \dots + t_n}$$

или

$$I_3 = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (7.19)$$

Расчетный эквивалентный ток сопоставляется с током I_n предварительно выбранного по каталогу двигателя, и если выполняется условие

$$I_3 \leq I_n, \quad (7.20)$$

то двигатель выбран верно.

Метод эквивалентного тока является проверочным для предварительно выбранного двигателя. Кроме того, в этом случае необходимо проверить двигатель на допустимую перегрузку по току по условию

$$I_{max} / I_n \leq \lambda_i, \quad (7.21)$$

где I_{max} - максимальное значение тока при наибольшей нагрузке; λ_i - допустимый коэффициент перегрузки по току.

Если последнее условие не выполняется, следует выбрать двигатель большей мощности, исходя из перегрузочной способности.

При наличии графиков нагрузки, содержащих участки с переменным значением нагрузки (тока) внутри участка (рис. 7.13), следует каждый из

таких участков заменить эквивалентным по потерям мощности с постоянным по величине током.

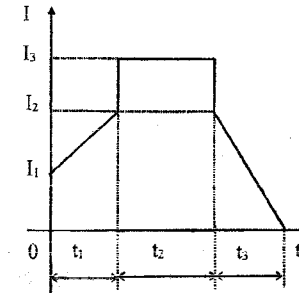


Рис. 7.13. График нагрузки, содержащий участки с переменными значениями нагрузки внутри участка

Выражения для определения эквивалентного тока внутри участка:

- для трапеции

$$I_3 = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2}{3}}$$

- для прямоугольника

$$I_3 = I_2$$

- для треугольника

$$I_3 = \sqrt{I_2^2 / 3}$$

Метод эквивалентного тока неприменим в случаях, когда существенно изменяется сопротивление обмоток в процессе работы двигателя.

Метод эквивалентного момента - основан на пропорциональной зависимости между током и моментом двигателя, на основании чего можно записать

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_0}}, \quad (7.22)$$

где t_0 - время паузы.

При этом двигатель выбран верно, если выполняется условие $M_n \geq M_3$.

Этот метод дополнительно к ограничениям, указанным для метода эквивалентного тока, не может быть использован для двигателей, у которых в процессе работы изменяется магнитный поток (например, для ДПТ последовательного возбуждения или для АД с короткозамкнутым ротором вне рабочей части характеристики). В этих случаях следует непосредственно определять потери в двигателе.

Метод эквивалентного момента является как проверочным, так и расчетным. Для предварительного расчета мощности двигателя его можно

использовать, если известны нагрузочная диаграмма $M_c(t)$ и тахограмма скорости двигателя.

Тогда

$$P_{расч} = M_{эв.с} \cdot \omega_{max} \quad (7.23)$$

где $P_{расч}$ - расчетная мощность двигателя; ω_{max} - максимальное значение скорости из тахограммы.

Определив $P_{расч}$, по каталогу выбирают двигатель из условия:

$$P_n \geq P_{расч} \cdot K_1 \quad (7.24)$$

и проверяют его на перегрузочную способность ($M_{max}/M_n \leq \lambda_M$).

Метод эквивалентной мощности - основан на использовании зависимости $P=M\omega$ и применим для проверки двигателей по нагреву, но лишь в том случае, если между мощностью и током существует прямо пропорциональная зависимость ($R=const$, $\Phi=const$, $\omega=const = \omega_{ном}$).

Эквивалентная мощность определяется по формуле:

$$P_э = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_0}} \quad (7.25)$$

где t_0 - время паузы, а двигатель считается выбранным верно, если выполняется условие

$$P_n \geq P_э \quad (7.26)$$

где P_n - мощность предварительно выбранного по каталогу двигателя.

Метод может быть применен для проверки на нагрев асинхронных, синхронных и двигателей постоянного тока независимого возбуждения, работающих с неизменной скоростью вращения. Этот метод применим и для предварительного расчета мощности двигателя по нагрузочной диаграмме $P_c(t)$, причем такой выбор считается более точным, чем предварительный выбор по средней мощности. Предварительный выбор в этом случае производят по формуле

$$P_{расч} K_3 = K_3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} \quad (7.27)$$

После предварительного выбора двигателя по методу эквивалентной мощности обязательно необходимо выполнить проверку двигателя на нагрев. С этой целью строятся нагрузочные диаграммы двигателя ($P(t)$ или $M(t)$ или $I(t)$), с помощью которых на основании одного из методов эквивалентных величин могут быть установлены условия нагрева двигателя в процессе работы. Дополнительной проверкой в этом случае является проверка на перегрузочную способность по моменту.

7.6. Выбор двигателя при работе в кратковременном режиме (режим S2)

Нагрев электродвигателя, работающего в кратковременном режиме, существенно отличается от нагрева в продолжительном режиме работы (рис. 7.14):

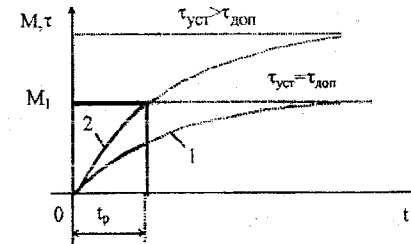


Рис. 7.14. График работы двигателя в кратковременном режиме работы

В течение времени t_p двигатель работает, развивая момент M_1 , а затем длительное время отключен. При этом за время работы температура частей машины не успевает достичь установившегося значения, а за время паузы двигатель успевает остыть до температуры окружающей среды.

Уравнение нагрева двигателя (при условии, что нагрузка на его валу неизменна) имеет вид:

$$\tau = \tau_y (1 - e^{-t/T_H}).$$

Если выбрать двигатель, рассчитанный на продолжительный режим работы, у которого $M_n = M_1$, то естественно, что при кратковременном режиме превышение температуры двигателя не достигнет $\tau_{уст}$, то есть, оно будет меньше $\tau_{доп}$, а сам двигатель окажется недоиспользованным по нагреву (рис. 7.14, кривая 1).

Очевидно, что для заданной нагрузки M_1 можно было бы подобрать двигатель с номинальным моментом, меньшим чем M_1 , но тогда при продолжительной работе превышение его температуры $\tau'_{уст}$ оказалось бы больше $\tau_{доп}$ для заданной нагрузки, однако при кратковременной работе за время t_p это превышение не успевает достичь значения $\tau'_{уст}$.

Очевидно, для работы с нагрузкой M_1 в течение времени работы t_p можно подобрать двигатель с таким номинальным моментом, меньшим M_1 , при котором к концу рабочего участка t_p превышение температуры двигателя достигает значения $\tau = \tau_{доп}$ (рис. 7.14, кривая 2). При этом двигатель будет полностью использован по нагреву, однако окажется перегруженным по моменту. Для количественной оценки перегрузки двигателя используются коэффициенты термической и механической перегрузок.

Коэффициентом термической перегрузки называется отношение потерь мощности при кратковременном режиме работы к потерям в номинальном режиме при продолжительном режиме работы при условии одинакового превышения температуры:

$$P_m = \Delta P_{(кр)} / \Delta P_{н.(пр)} \quad (7.28)$$

где $\Delta P_{(кр)}$ - потери при кратковременном режиме работы; $\Delta P_{н.(пр)}$ - потери мощности при номинальной продолжительной нагрузке.

Коэффициент механической перегрузки - это отношение допустимого по условиям нагрева момента при кратковременной нагрузке $M_{(кр)}$ к номинальному моменту $M_{н(пр)}$ при продолжительном режиме:

$$P_m = \frac{M_{(кр)}}{M_{н(пр)}} \quad (7.29)$$

В течение времени t_p превышение температуры двигателя определяется из уравнения:

$$\tau = \tau'_y (1 - e^{-t/T_n}), \quad (7.30)$$

где $\tau'_y = \frac{\Delta P_{(кр)}}{A}$ и в момент времени $t = t_p$ должно быть равно $\tau_{доп}$.

С другой стороны, дополнительный перегрев $\tau_{доп}$ равен установившемуся значению τ_y при продолжительной нагрузке двигателя с номинальным моментом $M_n = M_l$:

$$\tau_{доп} = \tau_{уст} = \Delta P_{н(пр)} / A.$$

С учетом того, что $\tau_{(при\ t=t_p)} = \tau_{доп} = \tau_{уст}$, из (7.28) и (7.30) можно определить коэффициент термической перегрузки:

$$P_m = \frac{\Delta P_{(кр)}}{\Delta P_{н(пр)}} = \frac{\tau'_y}{\tau_y} = \frac{1}{1 - e^{-t_p/T_n}} \quad (7.31)$$

Зная коэффициент P_m , можно вывести выражение для P_m . В окончательном виде:

$$P_m = \sqrt{\frac{a+1}{1 - e^{-t_p/T_n}}} - a \quad \text{или} \quad P_m = \sqrt{P_m(a+1) - a}, \quad (7.32)$$

где $a = k/v_n$ - коэффициент потерь, равный отношению постоянных потерь к переменным при номинальной нагрузке (если k неизвестно, то ориентировочно для номинального режима можно принять $k = v_n$); v_n - переменные потери в номинальном режиме.

Так как точная нагрузочная диаграмма двигателя при кратковременном режиме работы может быть получена при учете нагрузки в периоды как установившегося, так и переходных процессов, то при проектировании ЭП в данном случае следует:

- предварительно выбрать двигатель только по условию перегрузки

$$M_n \cdot \lambda_m \geq M_{с.мах};$$

- рассчитать переходные процессы и построить реальную нагрузочную диаграмму;
- пользуясь методами эквивалентных величин, привести диаграмму к виду, соответствующему постоянной нагрузке;
- на основании упомянутой диаграммы выполнить уточненный расчет.

Для кратковременного режима можно использовать как двигатели, предназначенные для работы в продолжительном режиме, так и из серии специальных машин, рассчитанных на кратковременную нагрузку (время работы этих двигателей нормируется: 15, 30, 60, 90 мин).

7.7. Выбор двигателя по мощности при работе в повторно-кратковременном режиме (S3)

Нагрузочные диаграммы для этого режима имеют вид, представленный на рис. 7.15.

Методика выбора двигателя по мощности в данном случае следующая.

Диаграммы мощности двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме для случая, когда нагрузка двигателя, время работы и время пауз не изменяются от цикла к циклу, приведены на рис. 7.15, а.

В этом случае, если $PB\%_{дейст}$ (рассчитываемое по нагрузочной диаграмме) равно стандартному значению $PB\%_{ст}$, то выбор двигателя производится по каталогу из соответствующей серии машин с $PB\%_{ст}$ из условия, чтобы мощность выбираемого по каталогу двигателя была не меньше мощности нагрузки. Необходимости в проверке двигателя на нагрев при этом нет.

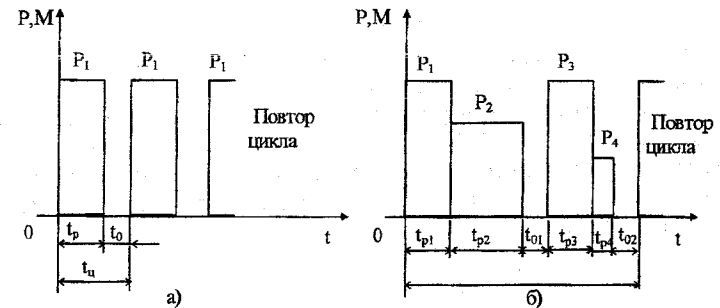


Рис. 7.15. Нагрузочные диаграммы, характеризующие повторно-кратковременный режим работы двигателя: а) - при неизменной нагрузке внутри цикла; б) - при многоступенчатой нагрузке внутри цикла.

Если $PB\%_{дейст} \neq PB\%_{ст}$, то в этом случае следует предварительно по каталогу выбрать двигатель с ближайшими по отношению к P_1 и $PB\%_{дейст}$ значениями P_n и $PB\%_{станд}$, а затем выполнить проверку двигателя на нагрев по одному из выражений:

$$\Delta P_n \geq \Delta P_1 \frac{PB_{дейст}\%}{PB_{ст}\%}; \quad (7.33)$$

$$I_n \geq I_1 \sqrt{\frac{PB\%_{дейст}}{PB\%_{ст}}}; \quad (7.34)$$

$$M_n \geq M_1 \sqrt{\frac{PB\%_{дейст}}{PB\%_{ст}}}; \quad (7.35)$$

$$P_n \geq P_1 \sqrt{\frac{PB\%_{дейст}}{PB\%_{ст}}}. \quad (7.36)$$

Выражения (7.35) и (7.36) позволяют выполнить расчеты для предварительного выбора двигателя.

Выражения (7.33), (7.34), (7.35) и (7.36) получены на основании следующих рассуждений. Допустим, что двигатель с $PB\%_{дейст}$ имеет мощность P_1 , а двигатель со $PB\%_{ст}$ имеет мощность P_n . На основании метода средних потерь можно утверждать, что среднее превышение температуры двигателя при его работе с $P_1 \neq P_n$ и $PB\%_{дейст} \neq PB\%_{ст}$ не будет больше допустимого значения превышения температуры для этого же двигателя, если средние потери мощности за цикл при P_1 и $PB\%_{дейст}$ не будут превышать средние потери при P_n и $PB\%_{ст}$, т.е.

$$\frac{\Delta P_1 t_{P1}}{t_n + t_{O1}} \leq \frac{\Delta P_n t_P}{t_P + t_O} \quad \text{или} \quad \Delta P_1 PB\%_{дейст} \leq \Delta P_n \cdot PB\%_{ст}$$

$$\text{Отсюда условие выбора двигателя} - \Delta P_n \geq \Delta P_1 \frac{PB_{дейст}\%}{PB_{ст}\%}.$$

Заменив в выражении (7.33) потери мощности через постоянную и переменную их составляющие, т.е.

$$\Delta P = \Delta P_{пост} + \Delta P_{пер} = \Delta P_{пост} + I^2 R \quad (\text{или } 3I_1^2 R + 3I_2^2 R_2),$$

можно получить после преобразования выражение (7.34) и т.д.

Диаграммы мощности двигателя, при работе в повторно-кратковременном режиме, при условии непостоянства нагрузки в пределах цикла приведены на рис. 7.15, 6.

В этом случае следует заменить реальную нагрузочную диаграмму на эквивалентную с постоянными по величине потерями мощности, током, моментом и мощностью (рис. 7.16):

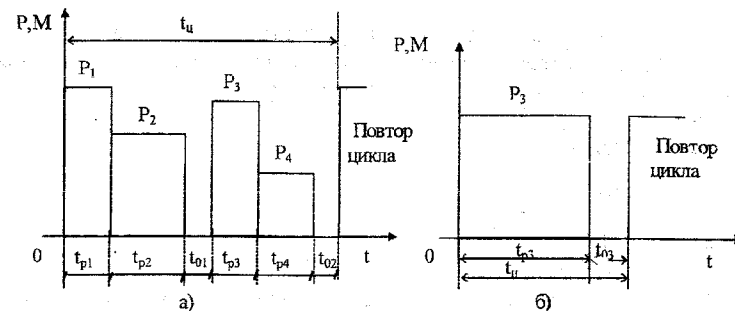


Рис. 7.16. Действительная (а) и эквивалентная (б) нагрузочная диаграммы для повторно-кратковременного режима работы со ступенчатой нагрузкой внутри цикла

Эквивалентное время работы за цикл:

$$t_{P3} = t_{P1} + t_{P2} + t_{P3} + t_{P4} = \sum_{i=1}^n t_{Pi}$$

Эквивалентное время пауз за цикл:

$$t_{O3} = \sum_{i=1}^n t_{Oi}$$

Эквивалентное значение $PB\%$:

$$PB_3\% = \frac{t_{P3}}{t_{P3} + t_{O3}} \cdot 100\% = \frac{\sum t_P}{\sum t_P + \sum t_O} \cdot 100\%. \quad (7.37)$$

Для определения средних потерь мощности, эквивалентных значений тока, момента, мощности, используемых для проверочных расчетов на нагрев, а также в случае, если заданы диаграммы $P(i)$ или $M(i)$, и для предварительного расчета мощности используются те же выражения, что и для расчетов в режиме S8 (перемежающийся), а именно:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 t_{P1} + \Delta P_2 t_{P2} + \dots + \Delta P_n t_{Pn}}{t_{P1} + t_{P2} + \dots + t_{Pn}}; \quad (7.38)$$

$$I_3 = \sqrt{\frac{I_1^2 t_{P1} + I_2^2 t_{P2} + \dots + I_n^2 t_{Pn}}{t_{P1} + t_{P2} + \dots + t_{Pn}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_{Pi}}{t_{P3}}}; \quad (7.39)$$

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_{P1} + M_2^2 t_{P2} + \dots + M_n^2 t_{Pn}}{t_{P1} + t_{P2} + \dots + t_{Pn}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_{Pi}}{t_{P3}}}. \quad (7.40)$$

В общем случае для повторно-кратковременного режима работы выбор двигателя по мощности производится в следующем порядке:

- по заданной нагрузочной диаграмме производственного механизма $P_c(t)$ или $M_c(t)$ определяется $PB_3\%$;

- производится расчет M , или P , за время работы в пределах цикла;
- пересчитываются значения M , или P , на ближайшие стандартные значения, и по каталогу производится выбор двигателя по одному из условий:

$$P_n \geq P_{\Sigma} \sqrt{\frac{PB_{\Sigma}\%}{PB_{\Sigma}\%}};$$

$$M_n \geq M_{\Sigma} \sqrt{\frac{PB_{\Sigma}\%}{PB_{\Sigma}\%}}.$$

Важным вопросом, определяющим работоспособность электродвигателя, является его охлаждение. Имеются двигатели самовентилируемые и с принудительным (внешним или внутренним) охлаждением. Как правило, вопросы вентиляции электрических машин решаются при проектировании систем электропривода.

Перечень литературы для самоподготовки

1. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. - 6-е изд., доп. И перераб. - М.: Энергоиздат, 1981. - 576 с.
2. Башарин А.В. и др. Примеры расчета автоматизированного электропривода. - Л.: Энергия, 1971.
3. Онищенко Г.Б. Асинхронный вентиляционный каскад. - М.: Энергия, 1967.
4. Онищенко Г.Б., Юньков В.Г. Электропривод турбомеханизмов. - М.: Энергия, 1972.
5. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. - М.: Госиздат, 1963.
6. Елисеев В.А., Шинянский А.В. Справочник по автоматизированному электроприводу. - М., 1983.
7. Чиликин М.Г., Соколов М.М., Терехов В.М., Шинянский А.В. Основы автоматизированного электропривода. - М.: Энергия, 1974.
8. Соколов Н.Г., Елисеев В.А. Расчеты по автоматизированному электроприводу металлорежущих станков. - М.: Высш. шк., 1969.
9. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер Н.С. Теория автоматизированного электропривода. - М.: Энергия, 1979.
10. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат. - 1986. - 416 с.
11. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. - М.: Энергия, 1977. 432 с.
12. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 199 с.
13. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях. - М.: Недра, 1992. - 236 с.
14. Попович М.Г., Борисюк М.Г., Гаврилюк В.А. та ін.: Теорія електропривода: Підручник. - К.: "Вища школа", 1993. - 494 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Общие понятия об электроприводе	5
1.1. Эволюция электропривода и его место в народном хозяйстве	5
1.2. Структура электромеханической системы и электрического привода	7
1.3. Классификация электроприводов	9
1.4. Основные проблемы и направления развития электропривода	12
2. Механика и преобразование энергии в электроприводе	15
2.1. Основные положения механики электропривода	15
2.2. Уравнение движения электропривода	17
2.3. Приведение моментов и сил сопротивления, моментов инерции и инерционных масс	25
2.4. Механические характеристики электродвигателей и рабочих машин	31
2.4.1. Механические характеристики рабочих машин	33
2.4.2. Механические характеристики электрических двигателей	36
2.5. Статическая устойчивость электропривода	40
3. Свойства и характеристики двигателей постоянного тока	45
3.1. Основные положения	45
3.2. Электромеханические и механические характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения	46
3.3. Определение параметров двигателей постоянного тока независимого возбуждения по каталожным данным	52
3.4. Режимы работы двигателей постоянного тока независимого возбуждения	53
3.4.1. Двигательный режим работы	53
3.4.2. Тормозные режимы работы	54
3.5. Способы регулирования скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения	61
3.5.1. Регулирование скорости вращения введением добавочного сопротивления в цепь якоря	62
3.5.2. Регулирование скорости изменением напряжения на якоре	64
3.5.3. Регулирование скорости изменением магнитного потока двигателя	65

3.6. Характеристики и режимы работы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения	68
3.6.1. Расчет естественной механической характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения	73
3.6.2. Искусственные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения	74
3.6.2.1. Искусственные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при введении в цепь якоря добавочного сопротивления	74
3.6.2.2. Искусственные характеристики при изменении напряжения на якоре	75
3.6.2.3. Искусственные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при шунтировании обмотки возбуждения	76
3.6.2.4. Характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при шунтировании якоря	78
3.6.2.5. Комбинированные схемы включения двигателей постоянного тока последовательного возбуждения с шунтирующими контурами	80
3.7. Тормозные режимы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения	81
3.7.1. Торможение противовключением	82
3.7.2. Режим динамического торможения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения	84
3.7.2.1. Торможение с самовозбуждением	84
3.7.2.2. Динамическое торможение с независимым возбуждением	88
3.8. Характеристики и режимы работы двигателей постоянного тока со смешанным возбуждением	89
3.8.1. Расчет естественной характеристики	91
3.8.2. Регулирование скорости двигателя постоянного тока смешанного возбуждения	93
3.8.3. Тормозные режимы работы тока смешанного возбуждения	94
3.8.3.1. Режим рекуперативного торможения	94
3.8.3.2. Режим торможения тока смешанного возбуждения противовключением	96
3.8.3.3. Режим динамического торможения	97
4. Свойства и характеристики двигателей переменного тока	99
4.1. Асинхронные двигатели в нерегулируемом электроприводе	99
4.2. Характеристики асинхронных двигателей с фазным ротором	99

4.2.1. Схема замещения асинхронного двигателя.....	99
4.2.2. Скоростные характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором.....	105
4.2.3. Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором.....	107
4.3. Тормозные режимы асинхронного двигателя с фазным ротором.....	112
4.3.1. Режим рекуперативного торможения.....	112
4.3.2. Торможение асинхронного двигателя с фазным ротором в режиме противовключения.....	115
4.3.3. Режим динамического торможения асинхронных двигателей с фазным ротором.....	118
4.4. Основные методы регулирования скорости асинхронных двигателей с фазным ротором.....	125
4.4.1. Реостатный метод регулирования скорости асинхронного двигателя.....	125
4.4.2. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением индуктивного сопротивления.....	127
4.4.3. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя переключением числа пар полюсов.....	131
4.4.4. Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением напряжения на статоре.....	133
4.4.5. Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением частоты питающего напряжения.....	135
4.4.6. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя введением в цепь ротора добавочной э.д.с.....	138
4.5. Несимметричные режимы работы асинхронного двигателя с фазным ротором.....	141
4.5.1. Несимметрия напряжения на статоре.....	141
4.5.2. Несимметрия сопротивлений в цепи ротора.....	147
4.6. Особенности работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	150
4.6.1. Расчет механических характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.....	156
4.7. Характеристики и механические свойства синхронного двигателя.....	158
4.7.1. Механические характеристики синхронного двигателя в двигательном режиме.....	159
4.7.2. Регулирование скорости синхронного двигателя.....	162
4.7.3. Тормозные режимы работы синхронного двигателя.....	163
4.7.4. Способы пуска синхронного двигателя.....	164
5. Системы многодвигательных электроприводов.....	168
5.1. Двухдвигательный электропривод постоянного тока с механической связью валов.....	169

5.1.1. Графический метод расчета характеристик двухдвигательного электропривода.....	171
5.1.2. Аналитический метод расчета нагрузок двухдвигательного электропривода при параллельном и индивидуальном питании якорных цепей.....	174
5.1.3. Аналитический метод расчета распределения нагрузок между двигателями двухдвигательного электропривода при последовательном питании якорных обмоток.....	177
5.1.4. Методы выравнивания нагрузок в двухдвигательном электроприводе постоянного тока.....	179
5.2. Асинхронный двухдвигательный электропривод с жесткой связью валов.....	182
5.2.1. Двухдвигательный асинхронный ЭП с параллельным включением роторных цепей на общий реостат.....	184
5.2.2. Двухдвигательный асинхронный электропривод с последовательно включенным реостатом в роторную цепь.....	187
5.3. Двухдвигательный синхронный электропривод с жесткой связью валов.....	190
6. Электропривод по системе электрический вал.....	195
6.1. Общие положения.....	195
6.2. Классификация электроприводов по системе электрический вал.....	196
6.3. Уравнительный электрический вал с синхронными вспомогательными машинами.....	199
6.4. Уравнительный электрический вал с асинхронными вспомогательными машинами.....	202
6.5. Рабочий электрический вал.....	208
7. Выбор электрических двигателей систем электропривода.....	211
7.1. Основные критерии для выбора электрических двигателей.....	211
7.2. Нагрев и охлаждение двигателей.....	213
7.3. Нагрузочные диаграммы и режимы работы электродвигателей.....	216
7.4. Выбор двигателя по мощности при продолжительном режиме работы.....	222
7.5. Методы проверки двигателей на нагрев.....	223
7.6. Выбор двигателя при работе в кратковременном режиме (режим S2).....	227
7.7. Выбор двигателя по мощности при работе в повторно-кратковременном режиме (S3).....	229
Перечень литературы для самоподготовки.....	233

Министерство образования Украины
Кременчугский государственный политехнический институт
Криворожский технический университет

Учебное издание

Татьяна Владимировна Величко
Дмитрий Иосифович Родькин

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Часть I

МЕХАНИКА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Учебное пособие

Подписано в печать 04.10.99. Формат 60 X 90 $\frac{1}{16}$.
Бумага офсетная. Печать ризопринтная. Тираж 200 экз.
Заказ 156

Издатель ЧП Щербатых
315307, Кременчуг, Победы 17/6

Отпечатано с готового оригинал-макета
на типографии ЧП Щербатых

Учебное пособие в трех частях: механика и характеристики двигателей в электроприводе; системы вентильных электроприводов; регулирование координат и переходные процессы; энергосбережение в системах электропривода посвящено изложению вопросов теории электропривода.

Первая часть посвящена механике и характеристикам двигателей в электроприводе.

Учебное пособие рекомендуется для студентов обучающихся по специальности 7.09220 "Электромеханические системы автоматизации и электропривод".