

Г. Б. ОНИЩЕНКО

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Учебник

Допущено

*Министерством образования и науки Российской Федерации
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки «Электротехника, электромеханика
и электротехнологии»*

2-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2008

УДК 62-83(075.8)
ББК 39.291я73
О-587

Рецензенты:

профессор кафедры «Автоматизированный электропривод» Московского
энергетического института, д-р техн. наук *В. М. Терехов*;
профессор кафедры «Автоматизированный электропривод» Московского
энергетического института, канд. техн. наук *В. В. Москаленко*

Онищенко Г. Б.

О-587 Электрический привод : учебник для студ. высш. учеб. за-
ведений / Г. Б. Онищенко. 2-е изд., стер. — М. : Издательский
центр «Академия», 2008. — 288 с.

ISBN 978-5-7695-4919-9

Изложены общие сведения об автоматизированном электроприводе,
его роли в современном машинном производстве, составе, элементной
базе и современных системах регулируемого электропривода. Описаны
принципы построения и управления электроприводов, а также их свой-
ства. Приведены характеристики электроприводов с двигателями постой-
янного и переменного тока. Отражены общие подходы к выбору и проек-
тированию электроприводов.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 62-83(075.8)
ББК 39.291я73

Учебное издание

Онищенко Г. Б. — Юрий Борисович

Электрический привод

Учебник

2-е издание, стереотипное

Редактор *И. С. Форстен*. Технический редактор *О. Н. Крайнова*
Компьютерная верстка: *Р. Ю. Волкова*. Корректоры *И. В. Могилевец, И. Н. Волкова*

Изд. № 102108527. Подписано в печать 30.01.2008. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Таймс». Бумага тип. № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 18,0 л.
Тираж 2000 экз. Заказ № 25828.

Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.02.953.Д.004796.07.04 от 20.07.2004.
117342, Москва, ул. Бултерова, 17-Б, к. 360. Тел./факс: (495) 330-1092, 334-8337.

Отпечатано в ОАО «Саратовский полиграфкомбинат».
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59. www.sarpk.ru.

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Онищенко Г. Б., 2006

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2006

ISBN 978-5-7695-4919-9

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

С развитием автоматизации производственных процессов автоматизированный электропривод получил широкое распространение. Повышается его роль во всех областях машиностроения, в коммунальном хозяйстве, медицине и других сферах деятельности человека. Поэтому для инженера-электрика необходимо знать основы автоматизированного электропривода. Этот учебник является введением в сложную область техники, которой является автоматизированный электропривод.

Задача учебника — дать студентам общее представление об автоматизированном электроприводе, его роли в современном машинном производстве, дать необходимые сведения о составе автоматизированных электроприводов, принципах построения и физических основах их работы, об основных системах электропривода, используемых в настоящее время, научить студента решать относительно простые технические задачи, связанные с выбором, проектированием и использованием электропроводов в различных областях техники.

В книге изложены основы электромеханического преобразования энергии, механики рабочих машин, описаны физические процессы, свойства и приведены характеристики электроприводов с двигателями постоянного и переменного тока. Изложены принципы управления электроприводами, общие подходы к выбору и проектированию электроприводов, а также сведения об элементной базе современных электроприводов и о наиболее распространенных системах автоматизированного электропривода.

Более углубленно вопросы теории и технической реализации современных электроприводов рассматриваются при изучении специальных дисциплин.

1.1. Назначение и функции электропривода

Электропривод (ЭП) является технической системой, служащей для преобразования электрической энергии в механическую [5], которая необходима для осуществления различных технологических процессов в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте, в коммунальной сфере, в быту, медицине и других сферах деятельности человека. Большинство рабочих машин (РМ), агрегатов, технологических линий и комплексов приводится в движение электрическим приводом.

Однако функции электропривода не ограничиваются только преобразованием энергии. Каждая рабочая машина нуждается в управлении: необходимо включать и выключать двигатели, приводящие в движение рабочие органы машины, изменять скорость и усилие на рабочих органах в соответствии с условиями осуществления технологического процесса, осуществлять необходимые защиты и блокировки, обеспечивающие безаварийную работу машин.

В тех случаях когда рабочая машина или технологический комплекс имеет несколько рабочих органов, каждый из которых приводится в движение своим электроприводом, в задачу управления входит согласование движений рабочих органов с требованиями технологического процесса.

Управление рабочей машиной может осуществляться оператором вручную или автоматически посредством устройств автоматического или программного управления. Даже если рабочие машины управляются вручную, ряд функций управления обычно автоматизирован для облегчения работы оператора и более точного выполнения технологического процесса.

Вторую функцию электропривода можно определить как управление движением исполнительных органов рабочей машины, причем это управление может осуществляться вручную с элементами автоматики или автоматически.

Сочетание двух функций электропривода — преобразования электрической энергии в механическую и управления переменными величинами, характеризующими механическую энергию

(мощность, усилие, крутящий момент, скорость, ускорение, путь и угол перемещения) в целях рационального выполнения технологического процесса, выполняемого рабочей машиной, — определяет назначение и роль электропривода в машинном производстве.

Рассмотрим некоторые примеры электроприводов и выполняемых ими функций.

На рис. 1.1 показана электрическая схема электропривода вентилятора, служащего для обмена воздуха в помещении. Преобразование электрической энергии в механическую, необходимую для приведения рабочего колеса F вентилятора во вращение, осуществляется асинхронным двигателем M . Для того чтобы вентиляторная установка могла работать, двигатель нужно включать и отключать. Эта функция управления реализуется с помощью магнитного пускателя KM и кнопок управления. При нажатии кнопки $SB1$ «Пуск» катушка пускателя получает питание и пускатель замыкает свои главные контакты, подключая двигатель к сети. Своим нормально открытым блок-контактом пускатель KM шунтирует кнопку «Пуск», вследствие чего после отпускания кнопки пускатель остается включенным. Отключение двигателя выполняется нажатием кнопки «Стоп» $SB2$, разрывающей цепь катушки пускателя.

Электропривод, показанный на рис. 1.1, содержит также защитные устройства для защиты от токов короткого замыкания в проводниках или в обмотке статора двигателя. Эта защита обеспечивается автоматическим выключателем QF , имеющим максимальный расцепитель. Защита двигателя от перегрузок реализуется по-

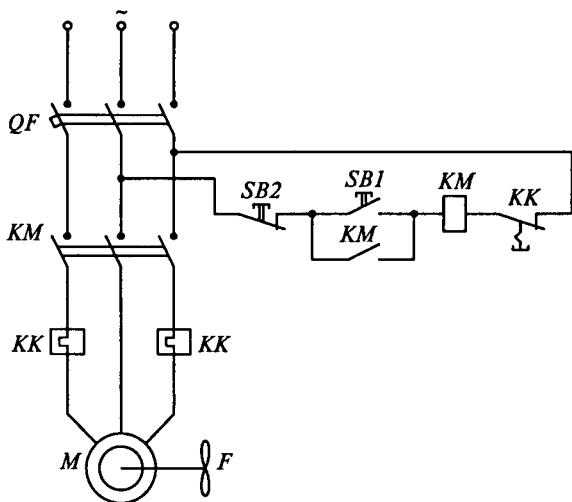


Рис. 1.1. Электрическая схема электропривода вентилятора

средством тепловых реле *КК*, входящих в состав магнитного пускателя.

В качестве второго примера рассмотрим электропривод лифтов. Лифт — автоматизированное средство вертикального пассажирского транспорта. Пассажир, войдя в кабину лифта, нажимает кнопку нужного ему этажа, после чего автоматически закрываются двери кабины и лифтовой шахты. Кабина лифта движется в нужном направлении и точно останавливается на уровне заданного этажа, двери открываются. Электродвигатель через редуктор, канатоведущий шкив и канатную передачу приводит кабину лифта в движение, выполняя преобразование электрической энергии в механическую, необходимую для осуществления движения кабины. Второй электромеханической системой является устройство открывания и закрывания дверей, состоящее из электродвигателя и кинематических механических звеньев.

Система управления лифтом осуществляет управление дверями, выбор направления движения кабины, обеспечивает плавный пуск, движение с установившейся скоростью, торможение и точную остановку кабины. Для обеспечения точности остановки и комфорта пассажиров в кабине нужно регулировать скорость движения по определенному закону. Для этого в лифтах со скоростью движения до 1,4 м/с применяют двухскоростные асинхронные двигатели, а в более быстроходных лифтах — электроприводы с плавным регулированием скорости. Кроме управления движением система управления лифтом содержит необходимые защиты и блокировки, обеспечивающие безопасность пассажиров и безаварийную работу оборудования, а также информацию о положении кабины.

В качестве третьего примера рассмотрим электромеханическую систему бытового аппарата — автоматической стиральной машины активаторного типа. Этот аппарат содержит многоскоростной электродвигатель вращения барабана, электронасос, электрические клапаны и аппаратуру программного управления. В соответствии с устанавливаемой программой машина автоматически осуществляет стирку, полоскание и отжим белья, залив и слив воды. Работа различных электрических и механических элементов функционально объединена устройством программного управления. Отдельные элементы образуют автоматическую электромеханическую систему, выполняющую требуемый технологический процесс. В состав этой электромеханической системы входят электродвигатели, осуществляющие преобразование электрической энергии в механическую, необходимую для осуществления данного технологического процесса, и устройство управления, обеспечивающее управление этим процессом.

Важная роль принадлежит электроприводу в создании энергосберегающих технологий. Многие технологические процессы свя-

заны с большими затратами электрической энергии, однако не всегда эти затраты оправданы. Характерным примером такого положения являются системы тепло- и водоснабжения. Насосные установки, подающие горячую и холодную воду потребителям, ранее оборудовали нерегулируемым электроприводом. Производительность насосов при этом не регулировалась или изменялась дросселированием на нагнетательном трубопроводе насоса. В то же время требуемая производительность насосных установок существенно изменяется в зависимости от времени суток и времени года. Регулирование производительности дросселированием связано с непроизводительными потерями энергии и не может осуществляться в автоматическом режиме.

В последние годы с появлением доступных технических средств для регулирования скорости асинхронных двигателей в качестве приводов насосов в системах тепло- и водоснабжения стали применять регулируемые электроприводы.

Регулируемый электропривод насоса выполняет две функции: преобразует электрическую энергию в механическую, необходимую для подачи воды потребителю, и управляет работой установки таким образом, чтобы поддерживать требуемые напор и расход воды. Это дает экономию электроэнергии около 30 %, воды — до 25 %, теплоты — до 10 % [5]. Рассмотренный пример показывает, что электропривод, позволяющий регулировать скорость рабочего органа механизма, обладает более широкими возможностями оптимального ведения технологического процесса, в частности обеспечивает экономное расходование электрической энергии.

Регулирование скорости рабочих органов машины является необходимым условием работы многих рабочих машин и механизмов.

Рассмотрим работу электропривода механизмов горного экскаватора типа механической лопаты (рис. 1.2). Рабочим органом экскаватора является ковш 3, размещенный на конце рукояти 4, которая шарнирно закреплена на стреле 2. Разрушение породы и наполнение ковша выполняют при поступательном движении рукояти с помощью механизма напора и одновременном движении ковша вверх, осуществляемом механизмом подъема. После наполнения ковша и подъема его на требуемую высоту включается механизм поворота, который вращает платформу 1 экскаватора, чтобы подвести поднятый ковш экскаватора к месту выгрузки. После этого ковш возвращается к забою, и цикл экскавации повторяется снова.

Структурная схема электромеханического комплекса экскаватора представлена на рис. 1.3. Электропитание экскаватора как подвижной машины осуществляется при напряжении 6 кВ (10 кВ) по гибкому кабелю. Кабель подсоединяется к приключательному пункту. Для подачи электроэнергии на борт экскаватора служит коль-

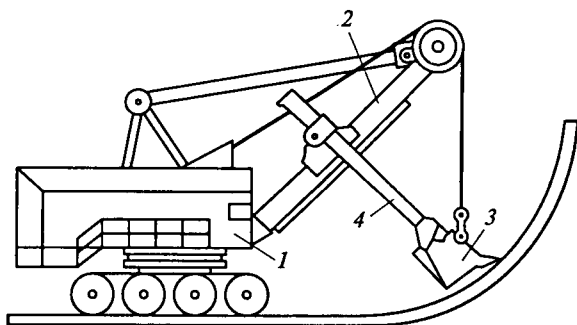


Рис. 1.2. Схема горного экскаватора типа механической лопаты:
1 — платформа; 2 — стрела; 3 — ковш; 4 — рукоять

цевой токоприемник. Для коммутации и защиты высоковольтных цепей служит высоковольтное распределительное устройство

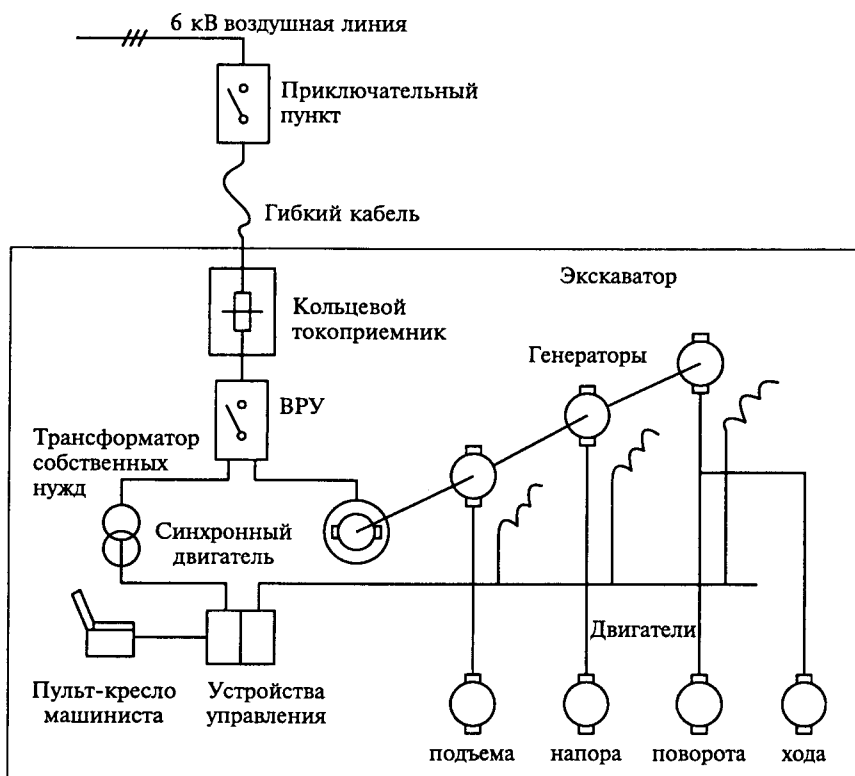


Рис. 1.3. Структурная схема электромеханического комплекса горного экскаватора

(ВРУ), от которого питается синхронный двигатель электромашиного преобразовательного агрегата.

Электропривод основных движений экскаватора — подъема, напора ковша, поворота и хода — осуществляется двигателями постоянного тока, которые получают питание от индивидуальных генераторов постоянного тока. Для управления электроприводами служат устройства управления и пульт-кресло машиниста. Механическая часть электропривода экскаватора включает в себя редукторы, барабанно-канатную передачу, зубчатую рейку привода напора и другие элементы. Общая система управления, объединяющая электромеханические системы отдельных механизмов экскаватора, должна обеспечивать оптимальные условия проведения процесса экскавации. Главным условием является высокая динамичность работы электропривода. Цикл экскавации для обеспечения его высокой производительности составляет всего 20...30 с. Экскаватор с ковшом вместимостью 5...20 м³ имеет общую массу несколько сотен тонн; велика масса ковша и других подвижных элементов машины. Движение ковша экскаватора должно точно соответствовать движению рукоятей управления, выполняемому машинистом. Во избежание поломки механических частей следует контролировать усилие на ковше при разрушении породы. Быстродействующее управление скоростью требует преодоления механической инерции элементов экскаватора, что вызывает необходимость применения достаточно сложных автоматических систем управления электроприводами.

Особо сложные электроприводы имеют металлорежущие станки с числовым программным управлением. Такие станки служат для автоматической обработки деталей по заданной программе с высокой точностью. Станок включает в себя блок главного движения, осуществляющий резание металла, и один или несколько механизмов движения подачи, осуществляющих позиционирование детали и точное движение режущего инструмента или обрабатываемой заготовки по заданной программе. Для электроприводов главного движения и движения подачи характерна высокая точность выполнения задания по скорости, а для приводов движения подачи — задания по положению. Диапазон регулирования скорости составляет для приводов главного движения 1000:1, а для приводов подач — 10 000:1. При этом необходима высокая точность поддержания заданной скорости. Требуемая точность позиционирования для механизмов подачи может достигать нескольких микрон. Таким образом, современный металлорежущий станок представляет собой совокупность электромеханических систем, основу которых составляют высокоточные автоматизированные электроприводы, выполняющие единую технологическую задачу и управляемые системой числового программного управления.

Рассмотрим еще один пример из области транспортной техники. Все большее распространение, особенно в США и Японии, получают электромобили. Фирма General Motors (США) создала легковые электромобили, по своим эксплуатационным характеристикам не уступающие традиционным автомобилям. Основное достоинство электромобилей — экологическая безопасность — обеспечит их широкое использование в ближайшие десятилетия. Существуют две схемы электромобилей: гибридная и с зарядными устройствами. В обеих схемах колеса автомобиля приводятся во вращение электродвигателями. В гибридных схемах источником энергии служит двигатель внутреннего сгорания, работающий в постоянном режиме, оптимальном с точки зрения расхода топлива и минимизации токсичности выхлопных газов. Двигатель внутреннего сгорания приводит во вращение электрический генератор, осуществляющий подзарядку буферных аккумуляторных батарей. Приводные электродвигатели переменного тока получают питание от аккумуляторных батарей через полупроводниковый преобразователь частоты.

В схеме электромобилей с зарядными устройствами дизель-генераторная установка отсутствует и приводные электродвигатели получают питание от аккумуляторных батарей, которые периодически заряжаются.

В состав электропривода входят электрические двигатели колес, источник электропитания, преобразователь частоты и система управления, обеспечивающая регулирование скорости электромобили и электрическое рекуперативное торможение с возвратом энергии для подзарядки аккумуляторов.

Приведенные примеры, а их может быть значительно больше, показывают, что электрический привод является одним из основных узлов каждой производственной машины или технологического комплекса. Это, как правило, наиболее сложная и дорогая часть рабочих машин. Конструирование, изготовление и эксплуатация электроприводов требуют высокой квалификации и разнообразных технических знаний.

1.2. Роль электропривода в современных машинных технологиях

В современном промышленном и сельскохозяйственном производствах, транспорте, коммунальном хозяйстве, сферах жизнеобеспечения и быта используют разнообразные технологические процессы, в большинстве которых применяют различные рабочие машины и механизмы. Там, где применяют производственные машины, используют электропривод. Практически все процессы, связанные с движением, при котором используется меха-

ническая энергия, осуществляются электроприводом. Исключения составляют лишь некоторые транспортные и сельскохозяйственные машины (автомобили, тракторы и др.), но и в этих областях перспективы использования электропривода стали вполне реальны.

Электропривод — главный потребитель электрической энергии. В развитых странах на долю электропривода приходится свыше 60 % всей вырабатываемой электроэнергии.

Электроприводы различны по своим техническим характеристикам: мощности, угловой скорости, конструктивному исполнению и т. д. Мощность электроприводов прокатных станов, компрессоров газоперекачивающих станций и других уникальных машин доходит до нескольких тысяч киловатт. Мощность электроприводов, используемых в различных приборах и устройствах автоматики, составляет несколько ватт. Мощность электропривода бытовых приборов и машин обычно 10...1000 Вт, электропривода станков — от 0,25 кВт до 100 кВт. Диапазон мощности электроприводов очень широк. Также велик диапазон электроприводов по частоте вращения. Так, частота вращения центрифуг — до 100 000 мин⁻¹. Есть механизмы, у которых частота вращения рабочего органа составляет менее 1 мин⁻¹.

Большинство производственных рабочих машин и механизмов приводится в движение электрическими двигателями. Электродвигатель вместе с механическими устройствами (редукторы, трансмиссии, кривошипно-шатунные механизмы и др.), служащими для передачи движения рабочему органу машины, а также с устройствами управления и контроля образует управляемую электромеханическую систему — электропривод, который является энергетической, кинематической и кибернетической (в смысле управления) основой функционирования рабочих машин.

В более сложных технологических машинных комплексах (прокатные станы, экскаваторы, многоцелевые станки и др.), где имеется несколько рабочих органов или технологически сопряженных рабочих машин, используются несколько электромеханических систем (электроприводов), которые в сочетании с электрическими системами распределения электроэнергии и общей системой управления образуют электромеханический комплекс.

Большие скорости обработки, высокая и стабильная точность выполнения технологических операций потребовали создания высокодинамичных электроприводов с автоматическим управлением. Стремление снизить материальные и энергетические затраты на выполнение технологических процессов обусловило необходимость технологической и энергетической оптимизации процессов, которая является одной из функций электропривода. На этапе технического развития машинного производства, достигнутого к концу XX в., электромеханические комплексы и системы

стали характеризовать технологические возможности и технический уровень рабочих машин, механизмов и технологических установок.

Создание современных электроприводов базируется на использовании новейших достижений силовой электроники, механики, автоматики, микроэлектроники и компьютерной техники. Это быстро развивающиеся области науки, что определяет высокую динамичность развития электромеханических систем.

Автоматизированный электропривод получил в последние десятилетия ускоренное развитие. Это определяется в первую очередь общим прогрессом машиностроения, направленным на интенсификацию производственных процессов, их автоматизацию, повышение точностных характеристик и других технических требований, связанных с обеспечением стабильности качества производимой продукции.

Второй причиной, обусловившей развитие электропривода, явилось распространение его применения не только на промышленное производство, но и на другие сферы деятельности человека: сельское хозяйство, транспорт, медицину и др.

Третья причина связана с наметившимся переходом от экстенсивного развития производства электрической энергии к более эффективному ее использованию. Повышение эффективности использования электроэнергии всецело связано с развитием электропривода. Речь идет не только об уменьшении потерь энергии при ее электромеханическом преобразовании, но и главным образом о том, что использование автоматизированного регулируемого электропривода позволяет оптимизировать сами технологические процессы в целях сокращения их энергоемкости.

Ускорение темпов технического прогресса в машиностроении и других областях, сокращение сроков морального устаревания поколений технических средств постоянно ставят новые задачи по дальнейшему развитию элементов и систем автоматизированного электропривода. Новые технологии, связанные с механическим движением, стали базироваться исключительно на использовании регулируемого автоматизированного электропривода.

1.3. Структура электропривода

Электропривод — это техническая система, предназначенная для приведения в движение рабочих органов машины и целенаправленного управления рабочими процессами, состоящая из электродвигательного, передаточного, преобразовательного и информационно-управляющего устройств [3].

Электродвигательное устройство — это электрический двигатель, преобразующий электрическую энергию в механическую,

т.е. являющийся электромеханическим преобразователем энергии (ЭМП). Двигатели могут быть различными по виду создаваемого ими движения (вращательное, линейное, шаговое, вибрационные колебания и др.). Большинство используемых электродвигателей — это машины вращательного движения. Для передачи движения от электродвигателя к рабочему органу машины служит механическое передаточное устройство: редуктор, трансмиссия, ременная передача, канатная передача, кривошипно-шатунный механизм, передача винт — гайка и др. (рис. 1.4). Передаточный механизм характеризуется коэффициентом передачи, представляющим собой отношение скорости на входе к скорости на выходе механизма. В некоторых рабочих машинах (насосы, вентиляторы,

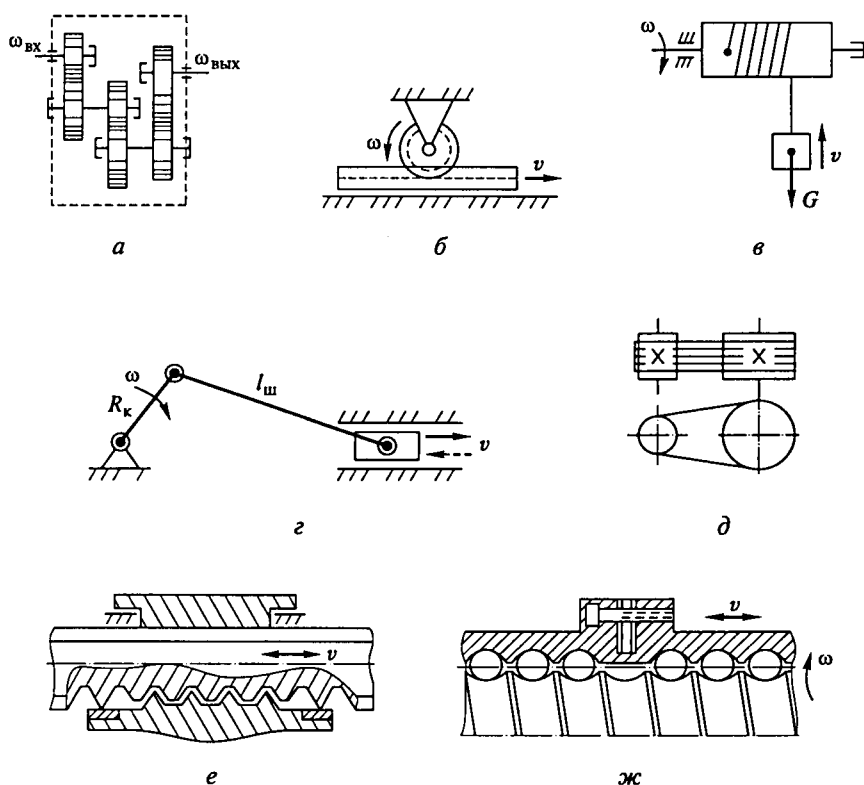


Рис. 1.4. Схемы механических передаточных устройств:

а — редуктор: $\omega_{вх}$, $\omega_{вых}$ — скорости соответственно входная и выходная; б — зубчато-реечная передача; в — барабанно-канатная передача: G — вес груза; г — кривошипно-шатунный механизм: R_k — радиус кривошипа; $l_{ш}$ — длина шатуна; д — релейная передача; е — винтовая передача; ж — шарико-винтовая передача

центрифуги и др.) механическое передаточное устройство, как правило, отсутствует.

Преобразовательное устройство — это преобразователь электрической энергии. Эти устройства применяются в регулируемом электроприводе для целенаправленного и экономичного изменения параметров движения электропривода: скорости, момента и др. Электроприводы получают электрическую энергию, как правило, от промышленной электрической сети трехфазного переменного тока частотой 50 Гц со стандартными значениями напряжения 220, 380, 660, 6000, 10 000 В. Поэтому для питания двигателей (например, постоянного тока) и для их регулирования необходимо преобразование электрической энергии, поступающей из сети, в электрическую энергию того вида, который необходим данному электродвигателю. К электрическим преобразовательным устройствам относятся, например, управляемые выпрямители, преобразователи частоты. В нерегулируемых электроприводах преобразовательное устройство, как правило, отсутствует.

Электрическое преобразовательное устройство (ПР) обычно представляет собой преобразователь, выполненный на силовых полупроводниковых приборах: неуправляемых (диоды) и управ-

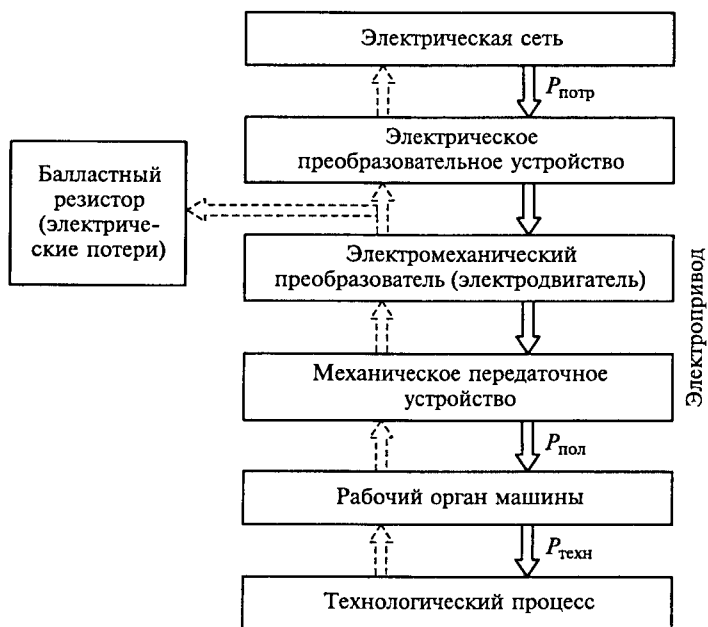


Рис. 1.5. Структурная схема силового канала электропривода:

$P_{\text{потр}}$, $P_{\text{пол}}$, $P_{\text{техн}}$ — мощность соответственно потребляемая, полная, технологически необходимая

ляемых (например, тиристоры, запираемые тиристоры, биполярные транзисторы с изолированным входом IGBT).

Электродвигательное, передаточное и преобразовательное устройства образуют силовой канал электропривода (рис. 1.5). Он состоит из электрической (преобразователь электрической энергии, электродвигатель) и механической (ротор и вал электродвигателя, механическая передача) частей.

При работе электропривода в двигательном режиме электрическая энергия, поступающая из сети, преобразуется электродвигателем в механическую энергию, которая передается рабочему органу машины и расходуется на выполнение технологического процесса (резание в металлорежущих станках, подача воды насосами, подъем груза краном и т. п.). Во всех звеньях силового канала часть энергии теряется. Следует стремиться сокращать потери энергии при ее преобразовании и передаче. Энергетическую эффективность электропривода обычно оценивают посредством КПД, который при однонаправленном потоке энергии определяют как отношение полезной мощности $P_{\text{пол}}$ на рабочем органе к потребляемой мощности $P_{\text{потр}}$.

КПД электропривода

$$\eta_{\text{эп}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{потр}}} = \eta_{\text{пр}} \eta_{\text{эмп}} \eta_{\text{м.п}},$$

где $\eta_{\text{пр}}$, $\eta_{\text{эмп}}$ — КПД преобразователей соответственно электрического и электромеханического; $\eta_{\text{м.п}}$ — КПД механической передачи.

КПД рабочей машины в целом

$$\eta = \frac{P_{\text{техн}}}{P_{\text{потр}}} = \eta_{\text{эп}} \eta_{\text{рм}},$$

где $P_{\text{техн}}$ — технологически необходимая мощность для выполнения данного производственного процесса; $\eta_{\text{рм}}$ — КПД собственно рабочей машины.

Электроприводы могут работать не только в двигательном, но и в тормозном режиме (например, спуск груза, принудительное торможение машины при останове и т. п.). В этом случае энергия торможения — потенциальная энергия спускаемого груза или кинетическая энергия движущихся масс — поступает в электромеханический преобразователь, который работает в режиме генератора. Эта энергия за вычетом потерь и совершаемой работой рабочим органом в процессе торможения работы отдается в питающую сеть, если система допускает рекуперацию энергии, если не допускает, — избыток энергии рассеивается в балластном резисторе. Направление потока энергии в режиме торможения показано на рис. 1.5 штриховыми линиями.

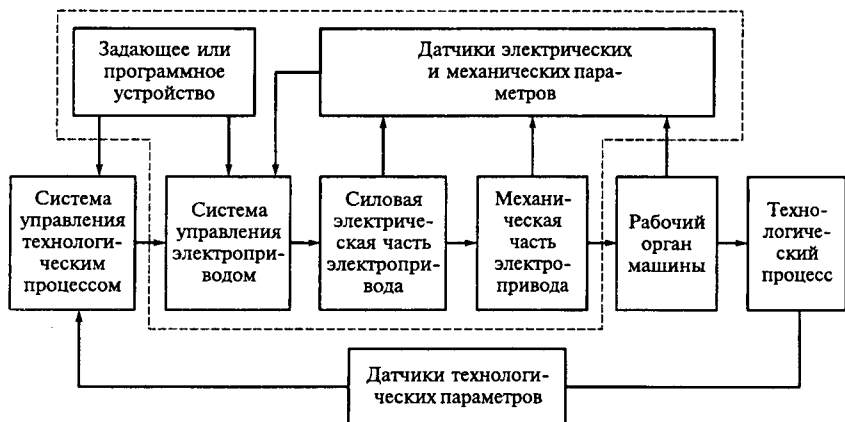


Рис. 1.6. Структурная схема автоматизированной электромеханической системы

Важнейшей функцией электропривода является управление преобразованной механической энергией, т.е. управление технологическим процессом. Его реализует входящее в состав электропривода информационно-управляющее устройство. Общая структурная схема автоматизированной электромеханической системы показана на рис. 1.6. Здесь штриховая линия обрамляет элементы системы, входящие в состав электропривода и образующие силовой (см. рис. 1.5) и информационный каналы электропривода [5].

Управляющее устройство состоит из аппаратов управления и защиты, осуществляющих включение, пуск, останов электропривода и защиту от аварийных и аномальных режимов работы, а также из электронных и микропроцессорных устройств управления. Для эффективного функционирования устройств управления необходима информация о переменных величинах, характеризующих работу электропривода и состояние технологического процесса. Для этой цели используют датчики технологических, механических и электрических величин, а также микропроцессорные устройства их обработки и анализа. Совокупность информационных и управляющих устройств образует информационный канал электропривода, предназначенный для управления переменными величинами (координатами) электропривода в соответствии с требованиями технологического процесса. Важной функцией системы управления является также осуществление технологического процесса с минимальными затратами электрической энергии.

В последние годы информационный канал электропривода все в большей степени реализуется с использованием устройств уп-

равляющей вычислительной техники: промышленных компьютеров, программируемых контроллеров, микропроцессорных средств и систем. Это позволяет, в частности, управлять отдельными электроприводами от управляющих устройств более высокого уровня автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУТП), объединяющих управление всеми производственными машинами, обслуживающими данный технологический процесс.

1.4. Классификация электроприводов

Электроприводы, используемые в различных технологических установках, разнообразны по своим функциональным возможностям, схемному и конструктивному исполнению, степени автоматизации, что связано с большим разнообразием рабочих машин. Электроприводы классифицируют по отдельным признакам:

- числу рабочих органов, приводимых электроприводом: индивидуальный, групповой;

- виду движения электродвигателя: вращательного движения, линейный, многокоординатного движения;

- способу соединения двигателя с рабочим органом: редукторный, безредукторный, конструктивно-интегрированный;

- регулируемости: нерегулируемый, регулируемый;

- основному контролируемому параметру: регулируемый по моменту, регулируемый по скорости, регулируемый по положению;

- виду управления: с ручным управлением, с полуавтоматическим управлением, с замкнутой системой автоматического регулирования (САР) скорости с ручным заданием или с заданием от системы управления технологическим процессом, с замкнутой САР положения, обеспечивающей точное позиционирование, с программным управлением, следящий.

Классификация по числу рабочих органов, приводимых в движение электроприводом. Электроприводы бывают индивидуальными и групповыми. Если каждый рабочий орган машины приводится в действие своим электроприводом, то он называется индивидуальным. Такой привод может быть однодвигательным либо многодвигательным. При групповом электроприводе один двигатель приводит в движение несколько рабочих органов. При этом усложняется кинематическая цепь рабочей машины и затрудняется управление рабочими органами, так как для раздельного управления рабочими органами необходимо применять специальные механические устройства: управляемые муфты, коробки передач, фрикционы и др. По мере развития техники групповой электропривод все больше вытесняется индивидуальным.

Классификация по виду движения электродвигателя. Наибольшее, а до недавнего времени исключительное применение получили электроприводы вращательного движения. Сейчас значительное внимание уделяется линейным двигателям. В тех механизмах, где рабочий орган совершает поступательное или возвратно-поступательное движение, применение линейных двигателей конструктивно гораздо удобнее, чем использование специальных кинематических пар: винт — гайка, кривошипно-шатунный механизм и др. Из-за низких энергетических и массогабаритных показателей линейные электродвигатели не находили применения. Создание новых эффективных конструкций линейных двигателей с питанием их от полупроводниковых преобразователей частоты открывает новые возможности использования линейных электроприводов для ряда производственных машин, в первую очередь для металлообрабатывающих станков.

Многокоординатные электроприводы на основе специальных шаговых электродвигателей являются отечественной разработкой и находят применение в высокоточных робототехнических установках, сборочных автоматах и для других целей. Многокоординатные электроприводы позволяют осуществлять пространственные движения рабочего органа по нескольким координатам.

Классификация по способу соединения двигателя с рабочим органом. Электродвигатели соединяются с рабочим органом машины либо непосредственно, либо через редуктор или другую кинематическую передачу. Непосредственное соединение двигателя с рабочим органом характерно для высокоскоростных рабочих машин, например насосов и вентиляторов. В других рабочих машинах, где скорость рабочего органа меньше номинальной скорости электродвигателя, применяют редукторы, которые снижают скорость и увеличивают момент на валу рабочего органа.

Для высокоточных механизмов и машин, работающих в динамичных режимах, стремятся исключать механические передачи между валом двигателя и рабочим органом. Такие электроприводы называют безредукторными. При этом, однако, возрастают габаритные размеры и масса приводного двигателя, поскольку эти параметры при одной и той же мощности двигателя примерно обратно пропорциональны номинальной скорости двигателя.

В последние годы стремятся, особенно для высокоточных электроприводов, конструктивно объединить рабочий орган с приводным электродвигателем. Примерами таких конструктивно-интегрированных электроприводов являются электрошпиндели (для шлифовальных станков), мотор-колеса (для транспортных средств) и др.

Новым направлением в технике является создание мехатронных модулей — электромеханических модулей, включающих в себя рабочий орган, электромеханическое устройство (двигатель) с

системой его регулирования и микропроцессорное управляющее устройство. Такие модули применяют в роботах и станках с числовым программным управлением.

Классификация по регулируемости. Под регулируемостью понимается возможность изменения или точного поддержания скорости, ускорения или момента (усилия) приводного электродвигателя.

Исторически сложилось, что большинство существующих электроприводов выполнено на базе короткозамкнутых асинхронных электродвигателей, не допускающих в стандартной схеме их питания регулирования скорости или момента. Модификацией односкоростных асинхронных электродвигателей являются двух- и трехскоростные двигатели. Электроприводы с многоскоростными двигателями дают возможность получать две или три фиксированные рабочие скорости, но не могут обеспечить плавного регулирования скорости в заданном диапазоне. К подобным по управляемости можно также отнести электроприводы с реостатно-контакторным управлением.

Регулируемый электропривод выполняет следующие функции:

- установка требуемой скорости в заданном диапазоне;
- стабилизация установленного значения скорости с заданной точностью при возмущающих воздействиях, например изменении нагрузки на валу двигателя;
- регулирование момента, развиваемого двигателем в двигательном и тормозном режимах, и ускорения (замедления) привода;
- формирование требуемого характера изменения скорости во времени $\omega = f(t)$ с заданной точностью.

Современной тенденцией является все более широкое использование регулируемых электроприводов.

Классификация по основному контролируемому параметру. В зависимости от технологических требований электропривод должен осуществлять регулирование по одной из главных контролируемых величин (координат): моменту, скорости или положению рабочего органа машины. Это не означает, что при этом не регулируются другие величины; при регулировании положения необходимо регулировать скорость и т. п.

Регулирование момента как основной регулируемой величины характерно для тех производственных машин, где контролируется натяжение обрабатываемого материала: намоточных устройств, линий обработки ткани и др. Наиболее часто основной контролируемой величиной является скорость. Для механизмов главного движения станков, клетей прокатных станов, конвейеров, питателей, насосов и многих других машин в соответствии с технологическим процессом требуется регулирование скорости. Есть механизмы, для которых необходимо позиционирование рабочего

органа или перемещение его по заданной траектории. Такие электроприводы управляются по положению.

В зависимости от диапазона регулирования скорости различают следующие регулируемые электроприводы:

- регулируемые приводы с ограниченным диапазоном регулирования (не более $2:1$);
- регулируемые приводы общего назначения с диапазоном регулирования не выше $100:1$;
- широкорегулируемые электроприводы (диапазон регулирования скорости порядка $1000:1$);
- высокоточные электроприводы (диапазон регулирования $10\,000:1$ и выше).

Классификация электроприводов по виду управления. Электроприводы с системами управления различаются по их функциональным возможностям и сложности. Наиболее простые системы с ручным управлением характерны для нерегулируемых электроприводов. Такие электроприводы имеют систему управления на основе релейно-контакторной аппаратуры, выполняющей функции пуска, останова, защиты и блокировки.

В электроприводах с полуавтоматическим управлением предполагается управление электроприводом оператором с помощью командоконтроллера, кнопок управления и других аппаратов. Система управления содержит элементы автоматического управления и регулирования, обеспечивающие автоматическое изменение параметров электропривода (например, переключение ступеней сопротивления пускового реостата в функции тока или времени) в соответствии с командами оператора. Такие системы характерны, например, для электропривода грузоподъемных кранов.

Для регулируемого электропривода, как правило, используются замкнутые САР по току и скорости. В этом случае управление может осуществляться операторами, например машинистами экскаваторов, прокатных станов. Задание на скорость может также осуществляться системой технологической автоматики (например, бумагоделательные машины, дозаторы). Одной из разновидностей являются позиционные электроприводы, которые обеспечивают точный останов рабочего органа механизма в заданном положении. Системы управления такими электроприводами содержат замкнутый контур положения, действующий постоянно или при входе рабочего органа в зону точного останова.

Если задающее воздействие на параметры движения рабочего органа формируется программными средствами, то такие электроприводы называют электроприводами с числовым программным управлением (ЧПУ). Приводы с ЧПУ содержат замкнутые контуры регулирования по скорости и положению.

Если положение рабочего органа должно изменяться в соответствии с заданием, характер которого заранее неизвестен, то

функцией электропривода в этом случае является слежение и отработка этого задания с необходимой точностью. Такой электропривод называют следящим.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение автоматизированного электропривода.
2. Укажите две основные функции электропривода.
3. Приведите примеры рабочих машин и их исполнительных органов.
4. Какие устройства образуют силовой (энергетический) канал электропривода?
5. Каково назначение электрического преобразовательного устройства в структуре электропривода?
6. Какие устройства входят в информационно-управляющий канал электропривода?
7. Как классифицируют электроприводы по виду движения электродвигателя?
8. Приведите классификацию электроприводов по виду управления.
9. Выполнение каких функций предполагает понятие «регулируемый электропривод»?
10. Какие причины определяют ускоренное развитие электропривода?

2.1. Механические характеристики двигателя и рабочего механизма

Назначение электропривода — приводить в движение рабочие машины и управлять этим движением. Величины, характеризующие движение рабочей машины, приведены в табл. 2.1.

Изменение величин, характеризующих линейное движение рабочих органов машины, происходит при воздействии на их кинематическую цепь (механическую часть) сил F , а при вращательном движении — момента M . Момент создается силой, приложенной к плечу (плечо — кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы), например к барабану грузоподъемной лебедки (рис. 2.1, а); или парой сил, возникающих в электродвигателях вращательного движения (рис. 2.1, б) $M = FR$.

Электрический двигатель вращательного движения является источником момента.

Таблица 2.1. Величины, характеризующие движение рабочей машины

Поступательное движение			Вращательное движение		
Величина	Формула для расчета	Единица измерения	Величина	Формула для расчета	Единица измерения
Путь S	—	м	Угол поворота φ	—	рад
Скорость v	$v = \frac{dS}{dt}$	м/с	Угловая скорость ω^*	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$	рад/с; с ⁻¹
			Частота вращения n	—	мин ⁻¹
Ускорение a	$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2S}{dt^2}$	м/с ²	Угловое ускорение ε	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$	рад/с ² ; с ⁻²
Сила F	—	Н	Момент M	—	Н · м
Масса m	—	кг	Момент инерции J	—	кг · м ²

* Далее вместо термина «угловая скорость» используется «скорость» (ω , с⁻¹).

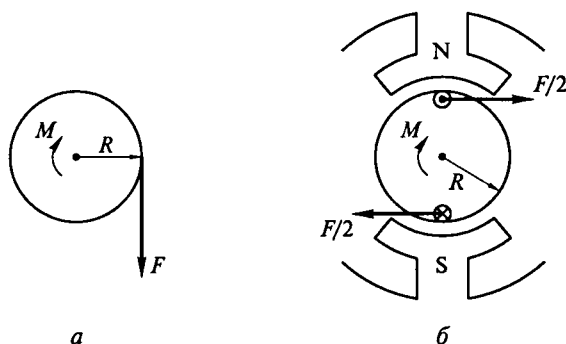


Рис. 2.1. Схемы формирования крутящего момента:
а — силой, действующей на плечо; *б* — парой сил

Знаки моментов, прикладываемых к механической части электропривода, нужно соотносить со знаком скорости. Направление вращения вала двигателя по часовой стрелке «Вперед» или против часовой стрелки «Назад» условно принимают за положительное, противоположное направление — за отрицательное. Соответственно скорость движения в направлении «Вперед» будет иметь знак «+», а скорость движения в направлении «Назад» — знак «-». Такой принцип соблюдают при определении знака скорости линейного движения, например линейного двигателя.

Момент, развиваемый электродвигателем, может быть положительным, когда двигатель при вращении вала в положительном направлении работает в двигательном режиме, преобразуя электрическую энергию в механическую, или отрицательным, тормозным, когда двигатель работает в генераторном режиме, преобразуя механическую энергию в электрическую. При изменении направления вращения знаки моментов изменяются на противоположные.

Момент двигателя зависит от его скорости. Взаимосвязь момента, развиваемого двигателем, и скорости $M = \varphi(\omega)$ определяет механические характеристики электропривода (электродвигателя). Механические характеристики изображаются в поле координат « $M - \omega$ ».

Оси координат разделяют поле на четыре квадранта (рис. 2.2). В квадранте *I* изображаются механические характеристики при работе двигателя в двигательном режиме и положительном направлении его скорости, в квадранте *II* — при работе в тормозных режимах. В квадранте *III* изображают механические характеристики двигателя при работе в двигательном режиме, но с отрицательным направлением скорости вращения, в квадранте *IV* — механические характеристики двигателя при работе в тормозном режиме и отрицательном направлении скорости. Обычно пользу-



Рис. 2.2. Поле координат « $M-\omega$ »

ются представлением механических характеристик в квадрантах I и II.

Основным параметром, определяющим вид механической характеристики, является ее жесткость (рис. 2.3)

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} \approx \frac{\Delta M}{\Delta \omega}, \quad (2.1)$$

где ΔM — приращение момента; $\Delta \omega$ — приращение скорости.

Если механическая характеристика прямолинейна (1), то ее жесткость — величина постоянная, равная тангенсу угла наклона характеристики к оси ординат; если характеристика криволиней-

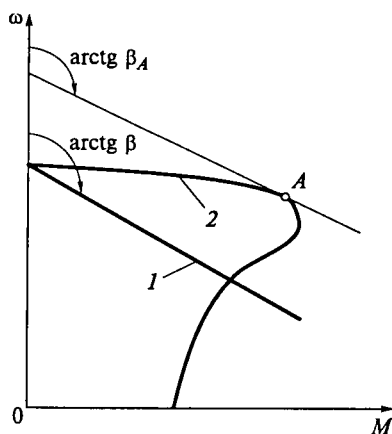


Рис. 2.3. К определению жесткости механических характеристик:

1 — прямолинейная механическая характеристика; 2 — криволинейная механическая характеристика

на (2), то жесткость определяется тангенсом угла наклона касательной к механической характеристике в данной точке (например, в точке *A*). Жесткость характеризует способность двигателя воспринимать приложение нагрузки (момента) на его валу.

Поскольку обычно с увеличением момента нагрузки скорость уменьшается, то жесткость β является величиной отрицательной.

Если при приложении нагрузки ΔM скорость $\Delta \omega$ уменьшается незначительно, то механическая характеристика считается жесткой. Если при том же значении прикладываемой нагрузки скорость изменяется значительно, то такую характеристику называют мягкой.

На рис. 2.4 показаны естественные механические характеристики основных видов электродвигателей вращательного движения:

1 — двигателя постоянного тока независимого возбуждения; его механическая характеристика имеет высокую жесткость, постоянную во всех точках;

2 — двигателя постоянного тока последовательного возбуждения; жесткость его механической характеристики непостоянна: она мала при малых нагрузках и повышается по мере возрастания момента;

3 — асинхронного двигателя; его механическая характеристика имеет две явно выраженные части: рабочую — с высокой постоянной отрицательной жесткостью, и криволинейную — с переменной положительной жесткостью; вторая часть характеристики используется только во время пуска двигателя;

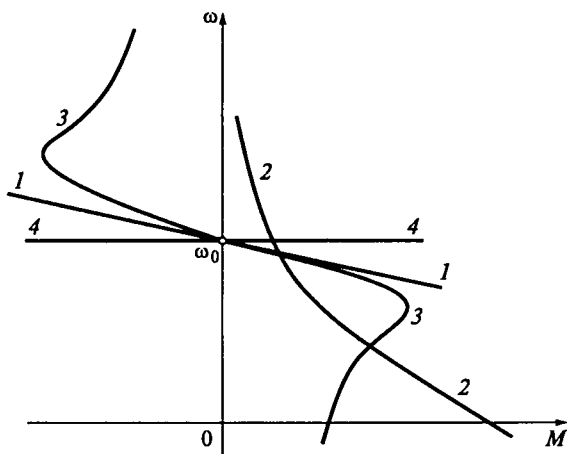


Рис. 2.4. Естественные механические характеристики двигателей:

1 — постоянного тока независимого возбуждения; 2 — постоянного тока последовательного возбуждения; 3 — асинхронного; 4 — синхронного; ω_0 — скорость идеального холостого хода

4 — синхронного двигателя; он имеет абсолютно жесткую механическую характеристику, параллельную оси абсцисс.

Приведенные на рис. 2.4 характеристики соответствуют типовой схеме включения, номинальному напряжению и частоте питания и отсутствию в цепях обмоток двигателя дополнительных элементов.

Искусственные (или регулировочные) механические характеристики получаются, когда в целях регулирования изменяются параметры питающего напряжения или в цепи обмоток вводятся дополнительные элементы (активные или индуктивные сопротивления, полупроводниковые приборы и др.).

Момент сопротивления движению M_c , создаваемый на рабочем органе машины, также может являться функцией скорости.

Зависимость момента сопротивления на валу рабочей машины от скорости $M_c = f(\omega)$ (M_c и ω приведены к валу двигателя) называют механической характеристикой рабочей машины. Ее отображают обычно в квадранте I поля координат « $M-\omega$ ».

На рис. 2.5 показаны механические характеристики некоторых рабочих машин. Характеристика 4 соответствует машинам с рабочим органом резания; если толщина снимаемого резцом слоя постоянна, то момент сопротивления такой машины не зависит от скорости. Характеристика 5 отвечает условиям работы машин, при которых момент сопротивления определяется главным образом силами трения (например, конвейеры). В этом случае момент сопротивления также не зависит от скорости механизма, однако при пуске механизма момент, создаваемый силами трения покоя, может существенно превышать момент сил трения при движении.

Характеристика 1 относится к грузоподъемным механизмам, где момент сопротивления движению создается главным образом силой тяжести. Особенностью данной характеристики является то, что момент при подъеме груза несколько превышает момент со-

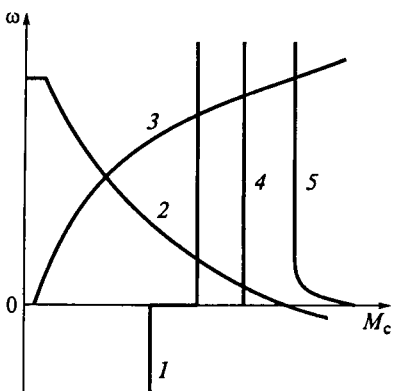


Рис. 2.5. Зависимость моментов сопротивления движению от скорости для некоторых рабочих машин: 1 — грузоподъемных механизмов; 2 — намоточных устройств; 3 — вентиляторов; 4 — с рабочим органом резания; 5 — конвейеров

противления при спуске груза (характеристика 1), что связано с учетом механических потерь в передачах.

Для турбомеханизмов (центробежных и осевых насосов, вентиляторов и компрессоров) момент на валу механизма существенно зависит от скорости — характеристика 3. Для вентиляторов эта зависимость имеет параболический характер

$$M_c = K\omega^2 + M_0.$$

Характеристикой 2, близкой к гиперболе, обладают намоточные устройства и другие машины, для которых технологически необходима работа с постоянной мощностью.

Следует отметить, что моменты на валу рабочей машины, определяемые ее механической характеристикой, не учитывают динамической составляющей момента, которая возникает при изменении скорости двигателя.

2.2. Двигательный и тормозной режимы работы электродвигателя

Любая электрическая машина как электромеханический преобразователь энергии (ЭМП) может работать в двух режимах: в двигательном, преобразуя подводимую электрическую энергию в механическую, или тормозном (генераторном) режиме, преобразуя подводимую механическую энергию в электрическую. В двигательном режиме (рис. 2.6, а) электрическая мощность, потребляемая из сети ($P_{\text{потр}}$), за вычетом потерь ΔP в силовом канале электропривода преобразуется в механическую и передается рабочему органу машины.

Тормозные режимы по своим энергетическим характеристикам могут быть различными.

Режим рекуперативного генераторного торможения. В этом режиме (рис. 2.6, б) кинетическая энергия, запасенная в движущихся элементах механической системы, или потенциальная энергия, отбираемая у рабочего органа (например, в режиме спуска груза), поступает на вал электродвигателя и преобразуется им как генератором в электрическую энергию. Электрическая энергия за вычетом потерь в электрической машине и преобразователе передается в сеть питания; в этом режиме электродвигатель работает как генератор параллельно с сетью питания. Такой режим торможения энергетически является наиболее выгодным, так как энергия торможения используется полезно.

Режим динамического торможения. В этом режиме двигатель отключается от сети и работает как автономный генератор, нагру-

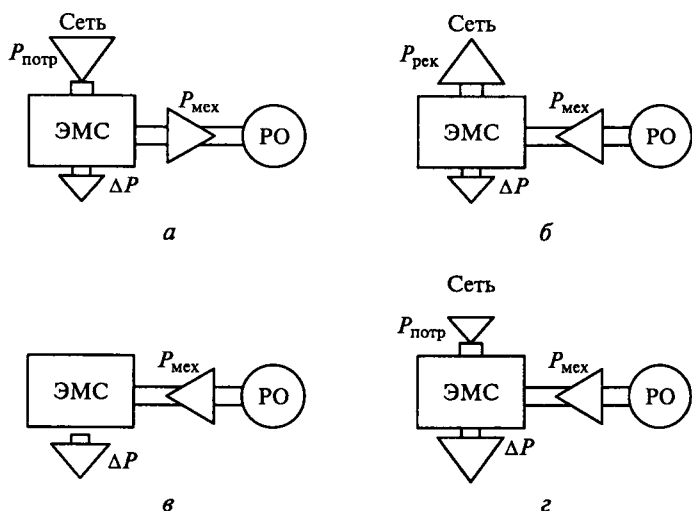


Рис. 2.6. Энергетические диаграммы режимов работы электропривода: *а* — двигательный режим; *б* — рекуперативное торможение; *в* — динамическое торможение; *г* — торможение противовключением; ЭМС — электро-механическая система; РО — рабочий орган; $P_{\text{потр}}$, $P_{\text{мех}}$, $P_{\text{рек}}$ — мощность соответственно потребляемая, механическая, рекуперлируемая; ΔP — потери мощности

женный на сопротивление; энергия торможения (рис. 2.6, *в*), поступающая на вал электродвигателя, преобразуется в электрическую и вся расходуется на потери в электрической машине и (в случае необходимости) во включенных в цепи обмоток машины резисторах.

Режим противовключения. В этом режиме двигатель, вал которого вращается в одном направлении, в целях торможения включается так, что вал вращается в противоположном направлении; двигатель при этом потребляет электрическую энергию из сети и механическую энергию торможения, поступающую на вал электродвигателя (рис. 2.6, *г*). Суммарная энергия расходуется на потери в электродвигателе и резисторах, включенных в цепи обмоток машины. Этот режим характеризуется большими потерями энергии.

Иногда режим противовключения используется в электроприводах грузоподъемных механизмов для создания подтормаживающего момента при спуске груза. В рассматриваемом режиме механизм движется под действием силы тяжести груза, а электродвигатель включается в направлении подъема груза, создавая посредством устройств регулирования необходимый тормозной момент. Энергетически этот режим идентичен режиму торможения противовключением.

При анализе энергетических диаграмм, характеризующих процесс торможения электропривода, следует учитывать, что если при торможении технологический процесс продолжается, то часть высвобождаемой кинетической энергии идет на совершение полезной работы.

2.3. Уравнение движения электропривода

К механической системе, совершающий вращательное движение относительно фиксированной оси вращения, прикладываются два момента: момент M , развиваемый двигателем, и момент сопротивления движению M_c (рис. 2.7).

Если момент, развиваемый электродвигателем, равен моменту сопротивления движению, т.е. $M = M_c$, то механическая система будет совершать движение с постоянной (установившейся) скоростью $\omega = \omega_{уст}$ или находиться в состоянии покоя ($\omega = 0$). Это соответствует первому закону механики Ньютона — закону инерции, который применительно к вращательному движению может быть сформулирован следующим образом: тело, имеющее фиксированную ось вращения, будет находиться в состоянии покоя или равномерного вращения до тех пор, пока приложенные моменты не выведут его из этого состояния:

$$\frac{d\omega}{dt} = 0, \text{ если } \sum_1^m M_i = 0, \quad (2.2)$$

т.е. если алгебраическая сумма моментов, прикладываемых к валу, равна нулю, то механическая система будет вращаться с постоянной скоростью $\omega_{уст}$ (или будет в состоянии покоя), т.е. находиться в установившемся режиме.

Для поступательного движения условие установившегося режима формулируется как $dv/dt = 0$, если $\sum_1^m \bar{F}_c = 0$. Таким обра-

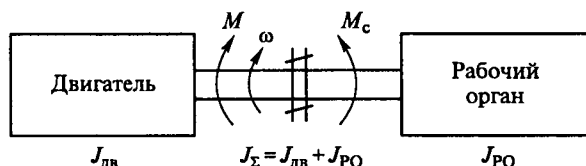


Рис. 2.7. Моменты, прикладываемые к механической системе с одной фиксированной осью вращения:

$J_{дв}$, $J_{ро}$, J_{Σ} — моменты инерции соответственно двигателя, рабочего органа, суммарный

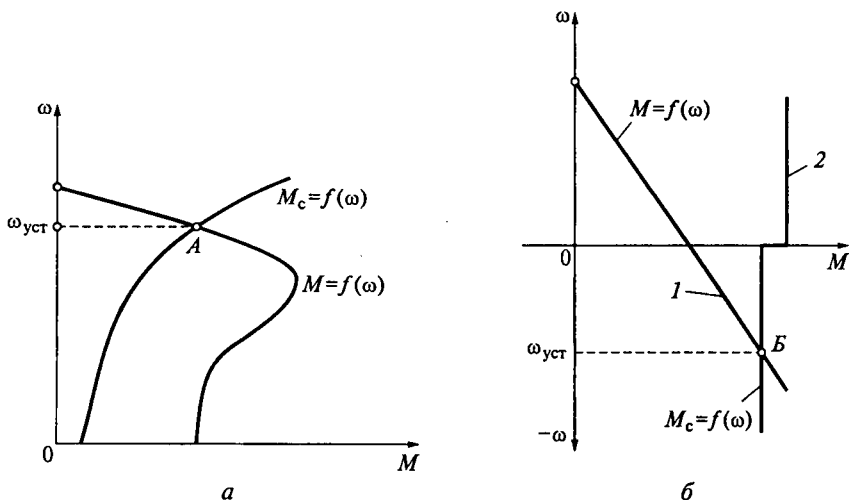


Рис. 2.8. Графическое определение скорости установившегося режима движения электропривода:

a — установившийся режим при двигательном режиме работы; *б* — установившийся режим при торможении противовключением; 1 — механическая характеристика асинхронного двигателя с добавочным резистором; 2 — активный момент сопротивления движению

зом, если сумма векторов сил, приложенных к механической системе, равна нулю, то система будет двигаться с постоянной установившейся линейной скоростью $v_{уст}$ или находиться в состоянии покоя.

Момент сопротивления движению называют статическим моментом, так как он характеризует установившийся режим работы электропривода.

Момент двигателя и статический момент зависят от скорости. Найти скорость установившегося режима работы механизма, когда известны механические характеристики двигателя и рабочего механизма, удобно графическим путем. График на рис. 2.8, *a* соответствует механической системе, состоящей из вентилятора и асинхронного двигателя. Точка A пересечения механических характеристик двигателя и вентилятора соответствует условию (2.2), т. е. установившемуся режиму работы. На рис. 2.8, *б* показаны механические характеристики грузоподъемной лебедки, работающей в режиме спуска груза (скорость отрицательна). Для обеспечения постоянной скорости спуска приводной электродвигатель переводится в режим торможения противовключением, которому соответствует механическая характеристика 1. Точка B пересечения этой характеристики с механической характеристикой лебедки соответствует условию $M = M_c$, т. е. установившемуся режиму движения.

Статические моменты подразделяют на активные и реактивные:

$M_{с.а}$ — активный момент сопротивления движению, прикладываемый к рабочему органу машины; этот момент создается силами тяжести (например, в грузоподъемных механизмах, лифтах и др.), силами ветра (механизм поворота башенных кранов) и т. д. Активные моменты могут как препятствовать движению, так и создавать движение. В соответствии с этим знак $M_{с.а}$ может быть отрицательным, если его направление противоположно знаку скорости, и положительным, если направление момента совпадает с направлением скорости;

$M_{с.р}$ — реактивный момент сопротивления движению, прикладываемый к рабочему органу машины. Этот момент возникает как реакция на движение рабочего органа и препятствует движению (например, момент от сил резания в механизмах главного движения металлорежущих станков, момент от аэродинамических сил вентиляторов и т. д.). При $\omega = 0$ $M_{с.р} = 0$. К реактивным моментам сопротивления относится также момент от сил трения в подшипниках, передачах и других элементах кинематической цепи рабочей машины. Момент трения препятствует движению.

Статический момент — полный момент сопротивления движению:

$$M_c = M_{с.а} + M_{с.р}. \quad (2.3)$$

Знаки всех моментов зависят от знака скорости. Если вектор момента совпадает с вектором скорости, то знак момента положителен. Иначе говоря, если момент способствует движению — он положителен, если препятствует — отрицателен. Результирующий момент, прикладываемый к валу электродвигателя,

$$M_{\Sigma} = M + M_c. \quad (2.4)$$

При положительном направлении движения в формуле (2.4) знак момента M , развиваемого двигателем, будет положительным, если он работает в двигательном режиме, и отрицательным, если работает в тормозном режиме. Знак активной составляющей статического момента $M_{с.а}$ будет отрицательным, если этот момент препятствует движению (например, подъем груза), и положительным, если этот момент способствует движению (например, спуск груза). С учетом (2.3)

$$M_{\Sigma} = M - M_c. \quad (2.5)$$

Для поступательного движения

$$\vec{F}_{\Sigma} = \vec{F} - \vec{F}_c, \quad (2.6)$$

где $\vec{F}$, $\vec{F}_c$ — векторы соответственно силы линейного двигателя и силы сопротивления движению.

Если результирующий момент $M_{\Sigma} = 0$, то механическая система будет находиться в состоянии покоя или равномерного установившегося движения. Если результирующий момент (или результирующая сила) не равен нулю, то происходит изменение скорости механической системы: при положительном M_{Σ} (или F_{Σ}) — ускорение; при отрицательном — замедление. Режимы, при которых $M_{\Sigma} \neq 0$, называют переходными, или динамическими.

Изменение скорости определяется вторым законом Ньютона — законом динамики, согласно которому для поступательного движения импульс силы равен изменению количества движения:

$$\bar{F}_{\Sigma} dt = d(m\bar{v}).$$

Импульс силы — это вектор, равный произведению вектора результирующей силы на время ее действия. Количество движения — это вектор, равный произведению вектора скорости на массу тела.

Если масса постоянна, то

$$\bar{F}_{\Sigma} = m \frac{d\bar{v}}{dt} = m\bar{a}, \quad (2.7)$$

где $\bar{a}$ — вектор ускорения.

Этот закон устанавливает, что если результирующая сила не равна нулю, то тело получает ускорение (замедление), значение которого зависит от значений силы и массы тела.

Для вращательного движения относительно фиксированной оси второй закон Ньютона формулируется следующим образом: импульс момента равен изменению количества движения:

$$M_{\Sigma} dt = d(J\omega). \quad (2.8)$$

Количество движения — произведение момента инерции вращающихся масс на их скорость, т. е. $J\omega$.

Момент инерции J (кг · м²) — параметр, являющийся мерой инерционности тел, вращающихся относительно фиксированной оси вращения. Момент инерции материальной точки с массой m равен произведению массы на квадрат расстояния R от точки до оси вращения: $J = mR^2$.

Момент инерции тела есть сумма моментов инерции материальных точек, составляющих это тело. Он может быть выражен через массу тела и его размеры. Значения момента инерции для тел вращения приводятся в каталогах и справочниках. Иногда в каталогах дается значение махового момента GD^2 . Момент инерции $J = GD^2/4$.

Отметим, что механическая инерционность вращающегося тела зависит не только от его массы, но и от диаметра. При одной и той же массе тело, имеющее больший диаметр, обладает значительно большим моментом инерции. Поэтому малоинерционные электродвигатели стремятся конструировать с меньшим диаметром ротора большей длины. Если же в состав кинематической цепи рабочей машины включается маховик, его целесообразно конструировать с большим диаметром.

Если момент инерции постоянен, то уравнение второго закона Ньютона можно представить в виде

$$M_{\Sigma} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.9)$$

Так как M_{Σ} определяет динамику механической системы, то результирующий момент M_{Σ} часто называют динамическим:

$$M_{\text{дин}} = M_{\Sigma} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.10)$$

Учитывая (2.5), получим

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

Это уравнение, отражающее второй закон Ньютона, называют уравнением движения электропривода.

Отметим, что в этом уравнении все моменты приложены к валу двигателя, а момент инерции J_{Σ} отражает инерционности всех масс, связанных с валом электродвигателя и совершающих вместе с ним механическое движение.

Для поступательного движения уравнение движения электропривода соответственно будет

$$F - F_c = m \frac{dv}{dt}, \quad (2.12)$$

где F — усилие, развиваемое двигателем; F_c — усилие сопротивления движению на штоке этого двигателя; m — масса подвижных элементов, связанных со штоком двигателя; v — линейная скорость штока двигателя.

2.4. Приведенное механическое звено

Если рабочий орган машины непосредственно связан с валом электродвигателя, то для анализа движения электромеханической системы «двигатель — рабочий орган» можно пользоваться

уравнением (2.11). Такая кинематическая схема характерна, например, для вентиляторов, насосов и других машин. Однако во многих случаях рабочий орган машины связан с валом электродвигателя через систему передач: зубчатых, канатных, тексропных и др. В этом случае непосредственное использование уравнения (2.11) невозможно, так как моменты M и M_c приложены к разным валам, а инерционные массы вращаются с разными скоростями.

Для того чтобы можно было использовать уравнение движения, необходимо решить задачу приведения всех моментов сопротивления и моментов инерции отдельных кинематических звеньев к одному валу, обычно к валу электродвигателя. Такое приведение является только расчетной операцией.

Принцип приведения моментов заключается в сохранении равенства мощностей. Приведение моментов инерции проводится на основе принципа сохранения кинетической энергии.

Если рабочий орган машины (РО) соединяется с валом двигателя (M) через редуктор с передаточным числом i (рис. 2.9, а), то, для того чтобы привести момент сопротивления $M_{c,PO}$, реально прикладываемый к рабочему органу, к валу двигателя, нужно соблюсти условие равенства мощностей

$$M_{c,PO}\omega_{PO} = M_c\omega, \quad (2.13)$$

где $M_{c,PO}$ — момент сопротивления движению (далее — статический момент); ω_{PO} — скорость рабочего органа; M_c — момент сопротивления, приведенный к валу электродвигателя; ω — скорость вала двигателя.

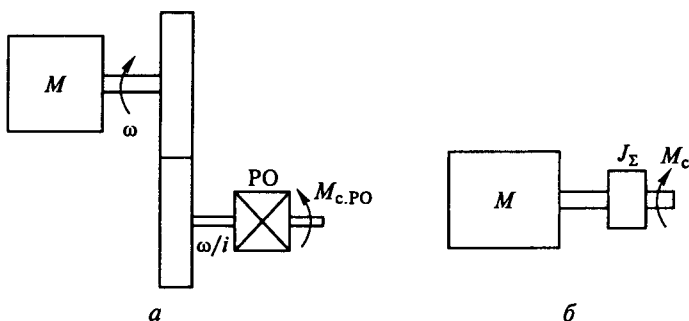


Рис. 2.9. Приведение моментов сопротивления и инерции к валу двигателя:

а — кинематическая схема рабочей машины с редуктором: M — двигатель; РО — рабочий орган; $M_{c,PO}$ — момент сопротивления на валу рабочего органа; i — передаточное отношение редуктора; б — схема приведения моментов сопротивления и инерции рабочего органа к валу двигателя: J_{Σ} — суммарный момент инерции; M_c — приведенный момент сопротивления

Если учитывать потери в редукторе, то в уравнение (2.13) следует ввести КПД передачи $\eta_{\text{ред}}$:

$$M_{\text{с.рО}} \omega_{\text{рО}} = M_{\text{с}} \omega \eta_{\text{ред}}.$$

Следовательно, если известен статический момент на валу рабочего органа, то статический момент, приведенный к валу двигателя,

$$M_{\text{с}} = \frac{M_{\text{с.рО}}}{(\omega / \omega_{\text{рО}}) \eta_{\text{ред}}} = \frac{M_{\text{с.рО}}}{i \eta_{\text{ред}}}. \quad (2.14)$$

Общее правило: для того чтобы привести статический момент к валу двигателя, нужно реальный статический момент на валу рабочего органа разделить на передаточное число и КПД передачи.

Для приведения момента инерции рабочего органа $J_{\text{рО}}$ к валу двигателя, нужно соблюсти условие равенства кинетических энергий

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

Следовательно, приведенный к валу двигателя момент инерции рабочего органа

$$J_{\text{рО.пр}} = \frac{J_{\text{рО}}}{i^2}. \quad (2.15)$$

Общее правило: для того чтобы привести момент инерции к валу двигателя, нужно реальный момент инерции кинематического звена разделить на квадрат передаточного отношения.

В результате приведения статического момента и момента инерции к валу двигателя вместо реальной кинематической схемы получаем расчетную (рис. 2.9, б), на основании которой можно пользоваться уравнением движения электропривода

$$M - M_{\text{с}} = (J_{\text{рот}} + J_{\text{рО.пр}}) \frac{d\omega}{dt}, \text{ или } M - M_{\text{с}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

где J_{Σ} — суммарный момент инерции движущихся частей привода, включая момент инерции ротора двигателя $J_{\text{рот}}$ и приведенный момент инерции рабочего органа $J_{\text{рО.пр}}$.

В некоторых кинематических схемах рабочих машин есть звенья с поступательным движением. Рассмотрим такой случай на примере кинематической схемы грузоподъемной лебедки (рис. 2.10).

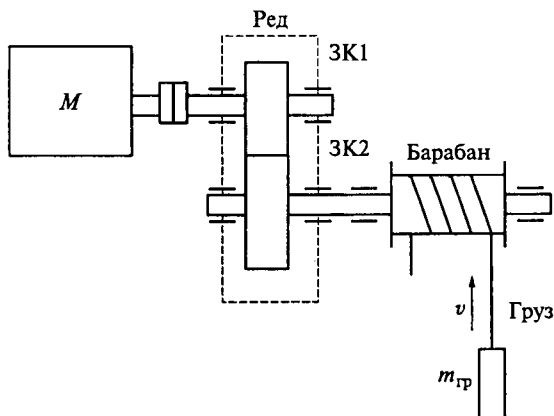


Рис. 2.10. Кинематическая схема грузоподъемной лебедки:

M — двигатель; Ред — редуктор; 3K1, 3K2 — зубчатые колеса редуктора; $m_{гр}$ — масса груза

Статический момент (активный) создается силой тяжести груза на крюке лебедки

$$G = m_{гр}g,$$

где $m_{гр}$ — масса груза; g — ускорение свободного падения.

Этот момент прикладывается к валу барабана лебедки и равен

$$M_{с.бар} = m_{гр}gR_{бар}.$$

где $R_{бар}$ — радиус барабана.

Для того чтобы привести статический момент к валу двигателя, в случае подъема груза нужно воспользоваться формулой (2.14)

$$M_c = \frac{M_{с.бар}}{i\eta_{ред}} = \frac{m_{гр}gR_{бар}}{i\eta_{ред}}.$$

Особенность данного случая при наличии активного статического момента в том, что приведенный статический момент для режимов подъема и спуска груза будет различным. При подъеме груза двигатель должен преодолевать сопротивление трения (потери мощности) в редукторе и других элементах, поэтому приведенный к валу двигателя статический момент будет несколько больше. При спуске груза, когда движение механической системы совершается под действием активного статического момента, приведенный к валу двигателя момент будет несколько меньше, так как силы трения действуют согласно с тормозным моментом дви-

гателя. Поэтому при спуске груза КПД передачи следует вводить в числитель формулы (2.14):

$$M_c = \frac{M_{с.бар}}{i} \eta_{ред}. \quad (2.16)$$

Следует заметить, что эта особенность проявляется только в случае приведения активного статического момента.

Для нахождения суммарного момента инерции механической системы воспользуемся формулой (2.15) для приведения вращающихся масс и принципом равенства кинетических энергий для приведения поступательно движущейся массы $m_{гр}$:

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

где $J_{гр}$ — момент инерции массы $m_{гр}$, линейно движущейся со скоростью v , приведенный к вращательному движению со скоростью вала двигателя ω .

Так как

$$v = \omega_{бар} R_{бар},$$

то

$$J_{гр} = \frac{m_{гр} R_{бар}^2}{i^2},$$

где $\omega_{бар}$ — скорость барабана.

Суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции рассматриваемой системы (см. рис. 2.9)

$$J_{\Sigma} = J_{рот} + J_{ЗК1} + \frac{J_{ЗК2} + J_{бар} + m_{гр} R_{бар}^2}{i^2},$$

где $J_{рот}$, $J_{бар}$, $J_{ЗК1}$, $J_{ЗК2}$ — моменты инерции соответственно ротора, барабана, зубчатых колес ЗК1, ЗК2 (см. рис. 2.10).

Уравнение движения электропривода для режима подъема груза следующее:

$$M - \frac{m_{гр} g R_{бар}}{i \eta_{ред}} = \left(J_{рот} + J_{ЗК1} + \frac{J_{ЗК2} + J_{бар} + m_{гр} R_{бар}^2}{i^2} \right) \frac{d\omega}{dt}.$$

Механическая часть электропривода включает в себя ротор электродвигателя, рабочий орган машины и систему механических передач и трансмиссий. Если все элементы механической части во всех движениях имеют равную или пропорциональную

скорость (угловую или линейную), то такая механическая система может рассматриваться как жесткая. В этом случае, пользуясь формулами приведения параметров к валу двигателя, можно рассматривать систему как жесткое механическое звено с суммарным приведенным моментом инерции J_{Σ} и для анализа ее динамических характеристик можно пользоваться уравнением движения электропривода (2.11). Такую механическую систему называют одномассовой.

Во многих случаях кинематическая схема рабочей машины содержит упругие элементы: торсионы, длинные валы, упругие муфты, тексропные, канатные передачи и др. В реальных схемах иногда приходится учитывать зазоры в зубчатых передачах и соединениях. В этих случаях кинематическую схему рабочей машины нельзя рассматривать как жесткую одномассовую систему. В особенности это касается высокоточных электроприводов и рабочих машин, работающих в интенсивном динамическом режиме.

В этом случае математическое описание процессов движения таких систем, называемых многомассовыми, существенно усложняется, и их анализ целесообразно проводить с использованием компьютерного моделирования.

Пример 2.1. Грузоподъемная лебедка, имеющая кинематическую схему, показанную на рис. 2.10, поднимает груз массой $m_{\text{гп}} = 1000$ кг. Максимальная скорость подъема груза $v_{\text{max}} = 1,0$ м/с. Ускорение и замедление при достижении максимальной скорости и снижении ее до нуля $a = 0,25$ м/с². Момент инерции барабана $J_{\text{бар}} = 80$ кг · м². Момент инерции ротора редуктора $J_{\text{рот}} = 1,5$ кг · м². Момент инерции ведущей и ведомой шестерен редуктора соответственно $J_{3\text{к1}} = 0,1$ кг · м² и $J_{3\text{к2}} = 5,0$ кг · м². Максимальная (номинальная) частота вращения двигателя $n_{\text{max}} = 600$ мин⁻¹. КПД редуктора $\eta_{\text{ред}} = 0,9$. Высота подъема груза $H = 24$ м. Радиус барабана $R_{\text{бар}} = 0,25$ м.

Задача — построить диаграмму изменения скорости и момента на валу электродвигателя за время подъема груза.

Решение. 1. Время ускорения (t_1) и замедления (t_3) груза при подъеме

$$t_1 = t_3 = \frac{v_{\text{max}}}{a} = \frac{1,0}{0,25} = 4 \text{ с.}$$

2. Пути, проходимые грузом за время t_1 (S_1) и t_3 (S_3):

$$S_1 = S_3 = \frac{at^2}{2} = \frac{0,25 \cdot 4^2}{2} = 2 \text{ м.}$$

3. Время движения с максимальной скоростью

$$t_2 = \frac{H - (S_1 + S_3)}{v_{\text{max}}} = \frac{24 - (2 + 2)}{1} = 20 \text{ с.}$$

4. Максимальная скорость двигателя

$$\omega_{\max} = \frac{\pi n_{\max}}{30} = \frac{3,14 \cdot 600}{30} = 62,8 \text{ с}^{-1}.$$

5. Максимальная скорость барабана

$$\omega_{\text{бар max}} = \frac{v_{\max}}{R_{\text{бар}}} = \frac{1}{0,25} = 4 \text{ с}^{-1}.$$

6. Передаточное отношение редуктора

$$i_{\text{ред}} = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\text{бар max}}} = \frac{62,8}{4} = 15,7.$$

7. Статический момент на валу барабана

$$M_{\text{с.бар}} = m_{\text{гр}} g R_{\text{бар}} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,25 = 2452 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

8. Статический момент, приведенный к валу двигателя,

$$M_{\text{с}} = \frac{M_{\text{с.бар}}}{i \eta_{\text{ред}}} = \frac{2452}{15,7 \cdot 0,9} = 174 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

9. Суммарный момент инерции механической системы, приведенный к валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{рот}} + J_{\text{ЗК1}} + \frac{J_{\text{ЗК2}} + J_{\text{бар}} + m_{\text{гр}} R_{\text{бар}}^2}{i^2} =$$

$$= 1,5 + 0,1 + \frac{5 + 80 + 1000 \cdot 0,25^2}{15,7^2} = 2,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

10. Момент на валу двигателя в период разгона t_1

$$M = M_{\text{с}} + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 174 + 2,2 \frac{62,8}{4} = 211 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

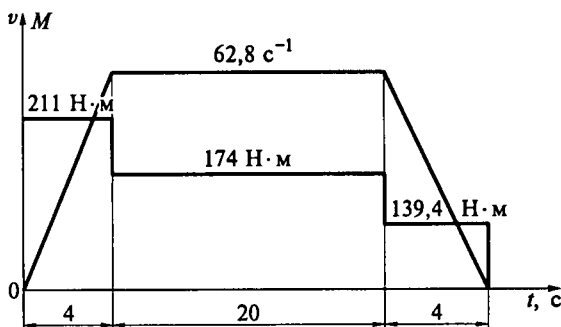


Рис. 2.11. Диаграмма скорости и момента на валу двигателя

11. Момент на валу двигателя в период движения с установившейся максимальной скоростью

$$M = M_c = 174 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

12. Момент на валу двигателя в период торможения t_3

$$M = M_c - J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 174 - 2,2 \frac{62,8}{4} = 139,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Диаграммы скорости и момента приведены на рис. 2.11.

Контрольные вопросы

1. Что отражают механические характеристики двигателя и рабочей машины?

2. Как, используя механические характеристики двигателя и рабочей машины, определить скорость установившегося режима работы машины?

3. Что такое жесткость механических характеристик, что она определяет?

4. В каких квадрантах поля « $M-\omega$ » располагаются механические характеристики для двигательного режима работы?

5. Какую жесткость имеют механические характеристики синхронного двигателя?

6. Какую жесткость имеют механические характеристики грузоподъемного механизма?

7. В каких тормозных режимах могут работать электроприводы?

8. Чему равен суммарный (динамический) момент на валу двигателя при работе в установившемся режиме?

9. Дайте определение жесткой механической системы.

10. Какова размерность момента инерции тела вращения?

11. Что нужно сделать, чтобы можно было пользоваться уравнением движения электропривода, если рабочий орган машины связан с валом электродвигателя через механическое передаточное звено?

12. В чем состоит принцип приведения статического момента к валу двигателя?

13. Как привести момент инерции рабочего органа к валу двигателя, если между ними имеется механическая передача?

14. В каком случае возникает неустановившееся движение электропривода?

15. У каких рабочих машин момент сопротивления пропорционален квадрату скорости?

3.1. Общие сведения

Наиболее распространенными типами электродвигателей являются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором, асинхронные двигатели с фазным ротором и синхронные двигатели (СД). Эти электродвигатели используют в нерегулируемых и регулируемых электроприводах.

У нерегулируемых электроприводов электродвигатель непосредственно включен в сеть питания без промежуточных преобразователей электрической энергии (преобразователей частоты и регуляторов напряжения). Для нерегулируемых асинхронных короткозамкнутых электродвигателей обычно используются следующие функции управления: включение и отключение двигателя, реверсирование направления вращения, иногда электрическое торможение двигателя. Для приводов с синхронными двигателями, кроме указанных функций, необходимо также регулирование тока возбуждения.

При использовании асинхронных двигателей с фазным ротором для обеспечения плавности пуска и снижения пусковых токов в цепь ротора на время пуска вводится добавочный резистор, сопротивление которого ступенчато уменьшается по мере разгона двигателя.

Управление нерегулируемым приводом осуществляется чаще всего с помощью контактной аппаратуры управления и защиты. В последнее время для коммутации цепей обмоток асинхронных двигателей используются также бесконтактные аппараты — тиристорные пускатели.

На рис. 3.1 представлены схемы включения и реверсирования асинхронного короткозамкнутого двигателя с использованием контактной и бесконтактной аппаратуры.

При включении контактора *КМ1* (рис. 3.1, *а*) происходит пуск двигателя *М* в направлении «Вперед». Для изменения направления вращения двигателя необходимо поменять порядок чередования фаз на статорных обмотках. Поэтому для пуска двигателя в направлении «Назад» включается контактор *КМ2*. При использовании бесконтактных тиристорных пускателей каждый полюс кон-

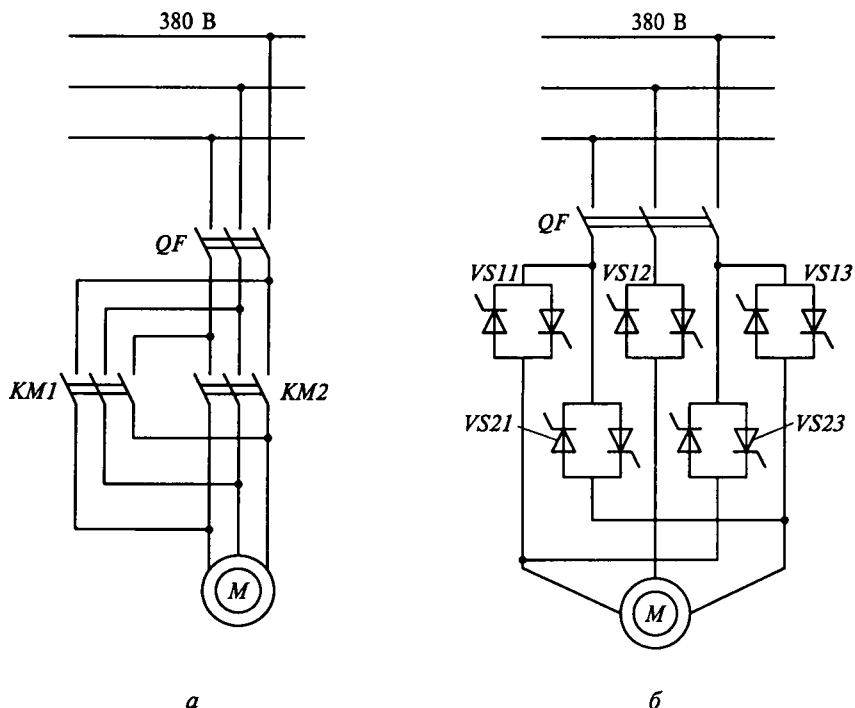


Рис. 3.1. Схемы включения асинхронного короткозамкнутого двигателя с использованием пускателей:

а — контактного; *б* — бесконтактного

тактора заменяется двумя тиристорами, включенными встречно-параллельно. При подаче импульсов на управляющие электроды тириستоров *VS11* (рис. 3.1, *б*), *VS12*, *VS13* двигатель включается в направлении «Вперед». При подаче импульсов на управляющие электроды тиристоров *VS21*, *VS12*, *VS23* двигатель включается с обратным направлением вращения. Защита от токов короткого замыкания и от перегрузки осуществляется автоматическим выключателем *QF*.

Основной характеристикой нерегулируемого электропривода являются номинальные данные приводного электродвигателя, т. е. те данные, которые относятся к основному расчетному режиму работы двигателя. Номинальная мощность определяется как мощность на валу двигателя, на которую он рассчитан по условиям нагревания в длительном режиме работы или в том режиме, для которого этот двигатель предназначен. К номинальным данным относятся также частота и напряжение питания, угловая скорость, ток в обмотках, КПД и $\cos \phi$, соответствующие номинальному режиму работы.

3.2. Электромеханические свойства асинхронных двигателей

3.2.1. Принцип работы асинхронного двигателя

Наиболее распространенными электрическими двигателями в промышленности, сельском хозяйстве и других сферах применения являются асинхронные двигатели. Можно сказать, что они являются основным средством преобразования электрической энергии в механическую.

Асинхронный двигатель является трехфазной индукционной электрической машиной переменного тока. На статоре двигателя располагаются три распределенные обмотки, сдвинутые относительно друг друга на 120° , если число пар полюсов машины $2p_n = 2$ (рис. 3.2, а). Если число пар полюсов, образуемых обмотками, $p_n > 1$, то соответственно увеличивается число секций обмотки и они сдвинуты геометрически относительно друг друга на $120^\circ/p_n$.

Фазные статорные обмотки асинхронного двигателя соединяют в «звезду» (рис. 3.2, б) или в «треугольник» (рис. 3.2, в). Обычно асинхронные двигатели малой и средней мощностей сконструированы на номинальное напряжение 380/220 В. При этом если напряжение питания 380 В, то обмотки соединяют в «звезду», если напряжение питания 220 В, то обмотки соединяют в «треугольник». В обоих случаях напряжение, прикладываемое к фазной обмотке статора двигателя, равно 220 В.

Работа асинхронного двигателя основана на формировании силового электромагнитного поля статора. Благодаря пространственному сдвигу обмоток на $120^\circ/p_n$ и временному сдвигу трех фаз напряжения, прикладываемого к обмоткам (фазы напряжений U_A , U_B и U_C сдвинуты на 120 электрических градусов, т. е. на

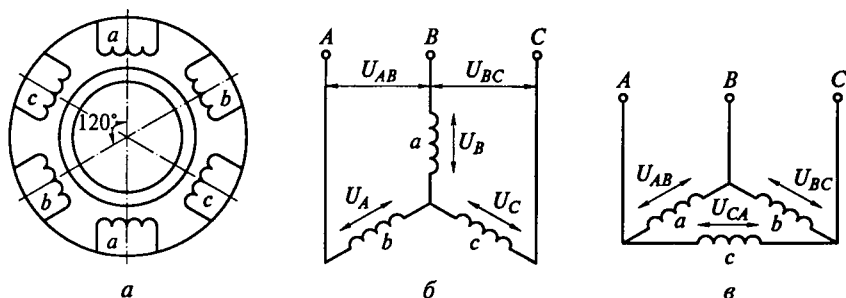


Рис. 3.2. Схемы включения обмоток асинхронного двигателя:

а — расположение обмоток асинхронного двигателя при $2p_n = 2$; б — соединение обмоток в звезду; в — соединение обмоток в треугольник

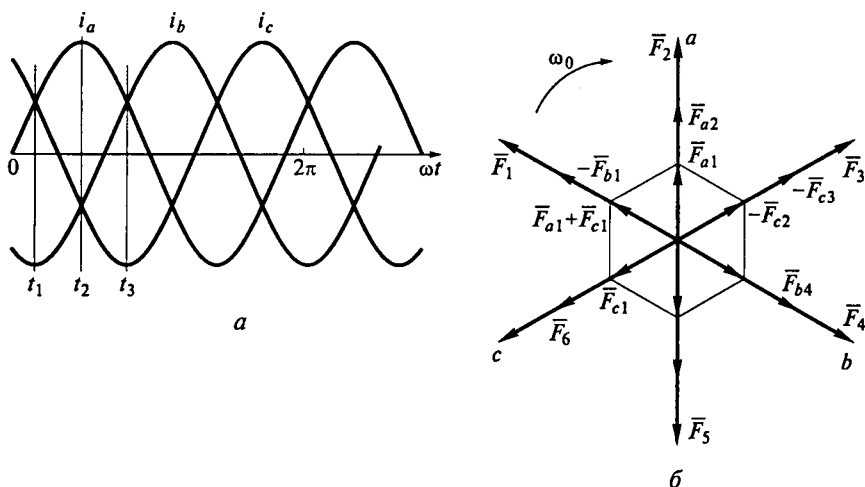


Рис. 3.3. Пояснение принципа образования вращающегося электромагнитного поля:

a — эпюры трехфазных токов в обмотках асинхронного двигателя; b — векторная диаграмма МДС, создаваемых токами в обмотках двигателя

$2\pi/3$ рад), результирующий вектор магнитодвижущих сил $\vec{F}$, создаваемых токами в обмотках двигателя, равномерно перемещается по окружности расточки статора со скоростью

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p_n}, \quad (3.1)$$

где f_1 — частота синусоидального тока в обмотках статора; p_n — число пар полюсов машины.

Поскольку воздушный зазор равномерен, машина симметрична и обмотки статора равномерно распределены, магнитодвижущие силы (МДС) создают магнитный поток, результирующий вектор которого вращается в пространстве со скоростью ω_0 .

Принцип образования вращающегося магнитного поля в обмотках статора пояснен на рис. 3.3. На рис. 3.3, a представлена эпюра трехфазных токов, протекающих по обмоткам статора (мгновенные значения токов в обмотках фаз a , b и c). Рассмотрим положение в пространстве результирующего вектора МДС статора в момент времени t_1 :

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{a1} + \vec{F}_{b1} + \vec{F}_{c1} = (\vec{i}_a + \vec{i}_b + \vec{i}_c)w,$$

где w — число витков обмотки статора.

Вектор МДС обмотки a $\vec{F}_{a1}$ направлен по оси a в положительном направлении, и МДС равна $0,5 I_{a \max} w$; вектор МДС обмотки c $\vec{F}_{c1}$ направлен по оси c в положительном направлении, и МДС равна $0,5 I_{c \max} w$. Сумма векторов $\vec{F}_{a1} + \vec{F}_{c1}$ направлена по оси e в отрицательном направлении; к этой сумме добавляется вектор МДС обмотки b , равный $-\vec{F}_{b \max}$. Сумма этих векторов образует пространственный вектор $\vec{F}_1$, пропорциональный $3/2 I_{\max}$ и занимающий пространственное положение (рис. 3.3, б).

Через $1/300$ с фаза токов статора изменится на $\pi/3$ и наступит момент времени t_2 , при котором вектор МДС обмотки a $\vec{F}_{a2}$ имеет максимальное положительное значение, а векторы МДС обмоток b и c — равное половине отрицательного значения. Результирующий вектор МДС $\vec{F}_2$ занимает в этот момент положение, показанное на рис. 3.3, б, т.е. перемещается по отношению к предыдущему положению $\vec{F}_1$ на пространственный угол 60° по часовой стрелке. Нетрудно убедиться, что в момент времени t_3 результирующий вектор МДС обмоток статора занимает положение $\vec{F}_3$, т.е. продолжает перемещаться в пространстве по часовой стрелке. За период питающего напряжения результирующий вектор МДС $\vec{F}$ совершает полный оборот по часовой стрелке, занимая далее последовательно положение $\vec{F}_4, \vec{F}_5, \vec{F}_6$.

Очевидно, что при изменении порядка чередования фаз напряжения, подводимого к обмоткам двигателя (если, например, поменяем местами фазы B и C на рис. 3.2, б, в), результирующий вектор потокоцепления будет вращаться против часовой стрелки, т.е. изменится направление вращения магнитного поля, образуемого токами в обмотках статора.

Если у двигателя число пар полюсов $p_n > 1$, то увеличивается число секций обмоток, располагаемых по окружности статора. Так, если число пар полюсов $p_n = 2$, то все три фазные обмотки расположены на обеих половинах окружности статора. В этом случае за время одного периода питающего напряжения вектор МДС статора $\vec{F}$ проходит половину окружности, т.е. поворачивается на 180 геометрических градусов, и скорость магнитного поля статора будет 2 раза меньше, чем у машин с $p_n = 1$. Следовательно, скорость магнитного поля статора ω_0 (синхронная скорость) обратно пропорциональна числу пар полюсов машины (табл. 3.1).

В зависимости от конструкции ротора асинхронного двигателя различают асинхронные двигатели с фазным ротором и с короткозамкнутым ротором. В двигателях с фазным ротором на роторе располагается трехфазная распределенная обмотка, соединенная обычно в звезду, концы обмоток соединены с контактными кольцами, через которые электрические цепи ротора выводятся из

Таблица 3.1. Зависимость скорости и частоты вращения асинхронных двигателей от числа пар полюсов

Число пар полюсов p_n	Скорость электромагнитного поля статора ω_0 , с^{-1}	Синхронная частота вращения асинхронного двигателя n_0 , мин^{-1}	Примерная номинальная частота вращения двигателя, мин^{-1}
1	314	3000	2940
2	157	1500	1450
3	104,6	1000	980
4	78,5	750	735
5	62,8	600	585
6	52,3	500	490

машины для подключения к пусковым резисторам с последующим закорачиванием обмоток. В короткозамкнутых двигателях обмотка выполнена в виде «беличьей клетки» — стержней, замкнутых накоротко с двух сторон кольцами. Несмотря на специфическую конструкцию «беличью клетку» также можно рассматривать как трехфазную обмотку, замкнутую накоротко.

Электромагнитный момент M в асинхронном двигателе создается благодаря взаимодействию вращающегося магнитного поля статора Φ с активной составляющей тока ротора:

$$M = 3k\Phi I'_{2a}, \quad (3.2)$$

где k — машинная постоянная; I'_{2a} — активная составляющая тока ротора.

Ток ротора возникает благодаря ЭДС E_2 , которая индуцируется в обмотках ротора вращающимся магнитным полем. Когда ротор неподвижен, асинхронный двигатель представляет собой трехфазный трансформатор с обмотками, замкнутыми накоротко или нагруженными на пусковой резистор. Возникающая при неподвижном роторе в его обмотках ЭДС называется номинальной фазной ЭДС ротора $E_{2н}$:

$$E_{2н} \approx \frac{U_1}{k_T}, \quad (3.3)$$

где U_1 — фазное напряжение статора; k_T — коэффициент трансформации.

ЭДС ротора E_2 при вращающемся двигателе и частота этой ЭДС (а значит, и частота тока в обмотках ротора) f_2 зависят от частоты пересечения вращающимся полем проводников обмотки ротора

(в короткозамкнутом двигателе — стержней). Эта частота определяется абсолютным скольжением

$$s_{абс} = \omega_0 - \omega, \quad (3.4)$$

где ω_0 , ω — скорость поля соответственно статора и ротора.

При анализе режимов работы асинхронного двигателя с постоянной частотой питающего напряжения (50 Гц) обычно пользуются относительным скольжением

$$s = \frac{s_{абс}}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (3.5)$$

Когда ротор двигателя неподвижен, $s = 1$.

Наибольшая ЭДС ротора при работе в двигательном режиме будет при неподвижном роторе ($E_{2н}$); по мере увеличения скорости (уменьшении скольжения) ЭДС E_2 будет уменьшаться:

$$E_2 = E_{2н}s. \quad (3.6)$$

Аналогично частота ЭДС и тока ротора f_2 при неподвижном роторе будет равна частоте тока статора f_1 , и по мере увеличения скорости будет уменьшаться пропорционально скольжению:

$$f_2 = f_1s. \quad (3.7)$$

В номинальном режиме скорость ротора незначительно отличается от скорости поля и для двигателей общего применения мощностью 1,5... 200 кВт номинальное относительное скольжение составляет всего 2... 3 %, а для двигателей большей мощности — порядка 1 %. Соответственно в номинальном режиме ЭДС ротора составляет 1... 3 % от номинальной ЭДС при $s = 1$. Частота тока ротора в номинальном режиме будет составлять 0,5... 1,5 Гц. При $s = 0$, когда скорость ротора равна скорости поля, ЭДС ротора E_2 и ток ротора I_2 будут равны нулю, момент двигателя также будет равен нулю. Этот режим является режимом идеального холостого хода.

3.2.2. Механические характеристики асинхронного двигателя

Рассмотрим работу асинхронного двигателя с фазным ротором, обмотки которого замкнуты накоротко.

Как уже указывалось (3.2), момент двигателя пропорционален потоку Φ и активной составляющей тока ротора $I'_{2а}$, приведенно-

го к статору. Поток, создаваемый обмотками, зависит от значения и частоты питающего напряжения

$$\Phi = \frac{U_1}{k\omega_0}. \quad (3.8)$$

Ток ротора

$$I_2 = \frac{E_{2н}s}{Z_2}, \quad (3.9)$$

где Z_2 — полное сопротивление фазы обмотки ротора.

Следует учитывать, что индуктивное сопротивление обмотки ротора x_2 является величиной переменной, зависящей от частоты тока ротора, а следовательно, от скольжения:

$$x_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 s L_2,$$

где L_2 — индуктивность рассеяния обмоток ротора.

При неподвижном роторе при $s = 1$ индуктивное сопротивление обмотки ротора наибольшее. По мере роста скорости (уменьшении скольжения) индуктивное сопротивление ротора x_2 уменьшается и при достижении номинальной скорости составляет всего 1...3 % от величины сопротивления при $s = 1$. Обозначив $x_{2s=1} = x_{2н}$, получим

$$x_2 = x_{2н}s. \quad (3.10)$$

Тогда

$$I_2 = \frac{E_{2н}s}{\sqrt{(x_{2н}s)^2 + r_2^2}}, \quad (3.11)$$

где $x_{2н}$ — индуктивное сопротивление обмотки ротора при $s = 1$;
 r_2 — активное сопротивление обмотки ротора.

Активная составляющая тока ротора

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = \frac{E_{2н}r_2s}{(x_{2н}s)^2 + r_2^2}, \quad (3.12)$$

$$\text{где } \cos \varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{(x_{2н}s)^2 + r_2^2}}. \quad (3.13)$$

Приведем параметры цепи ротора к обмотке статора с учетом коэффициента трансформации $k_T = U_1/E_{2H}$. Приведение параметров проводится на основе соблюдения равенства мощностей:

$$E'_2 = E_2 k_T; \quad I'_2 = \frac{I_2}{k_T}; \quad r'_2 = r_2 k_T^2; \quad x'_2 = x_2 k_T^2. \quad (3.14)$$

С учетом (3.14)

$$I'_2 = \frac{E'_{2H} s}{\sqrt{(x'_{2H} s)^2 + (r'_2)^2}}; \quad I'_{2a} = \frac{E'_{2H} r'_2 s}{(x'_{2H} s)^2 + (r'_2)^2}. \quad (3.15)$$

Разделив числитель и знаменатель первой формулы (3.15) на s , получим

$$I'_2 = \frac{E'_{2H}}{\sqrt{(x'_{2H})^2 + \left(\frac{r'_2}{s}\right)^2}}. \quad (3.16)$$

Деление числителя и знаменателя на s , конечно, не нарушает справедливость равенства (3.16), но не соответствует физической сущности электромагнитных процессов. В действительности, как это следует из формулы (3.11), от скольжения зависит индуктивное сопротивление ротора x_2 , а активное сопротивление r_2 остается постоянным. В то же время, используя выражение (3.16), можно составить схему замещения асинхронного двигателя (рис. 3.4, а).

Для анализа нерегулируемого электропривода эту схему можно упростить, перенеся контур намагничивания на зажимы двигателя. Упрощенная П-образная схема замещения с вынесенным на-

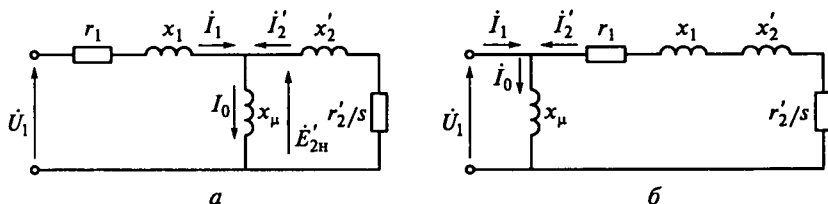


Рис. 3.4. Схемы замещения асинхронного двигателя:

а — полная схема; б — схема с вынесенным намагничивающим контуром

магнитизирующим контуром представлена на рис. 3.4, б. В соответствии с этой схемой, ток ротора

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{x_k^2 + \left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2}}, \quad (3.17)$$

где x_k — индуктивное сопротивление короткого замыкания, $x_k = x_1 + x'_{2н}$.

Активная составляющая тока ротора:

$$I'_{2a} = \frac{U_1 \frac{r'_2}{s}}{x_k^2 + \left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2}. \quad (3.18)$$

Подставив (3.8) и (3.18) в (3.2), получим выражение для момента асинхронного двигателя

$$M = \frac{3U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{\omega_0 \left[x_k^2 + \left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 \right]}. \quad (3.19)$$

Пользуясь этим выражением, строят механическую характеристику асинхронного двигателя $s = f(M)$.

На рис. 3.5 приведены характеристика асинхронного двигателя с фазным ротором и электромеханическая характеристика двига-

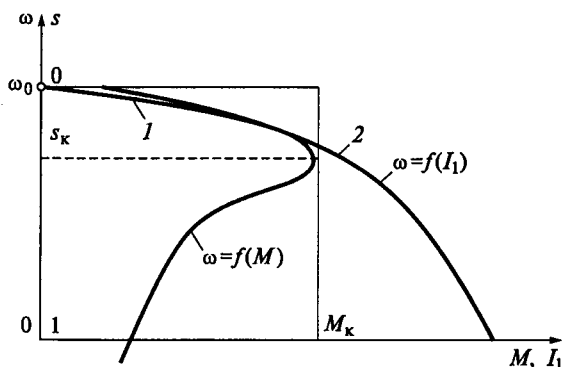
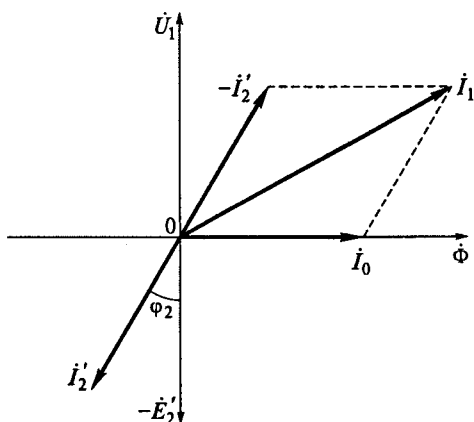


Рис. 3.5. Примерные механическая (1) и электромеханическая (2) характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором, замкнутым накоротко

Рис. 3.6. Упрощенная векторная диаграмма асинхронного двигателя



теля $\omega = f(I_1)$, определяемая из векторной диаграммы асинхронного двигателя (рис. 3.6).

Полагая ток намагничивания реактивным, получим

$$I_1 = \sqrt{(I_0 + I_2' \sin \varphi_2)^2 + (I_2' \cos \varphi_2)^2} = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2I_0 I_2' \sin \varphi_2}, \quad (3.20)$$

$$\text{где } \sin \varphi_2 = \frac{x_k}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_k^2}}. \quad (3.21)$$

Полагая $dM/ds = 0$, найдем максимальный (критический) момент асинхронного двигателя M_k и соответствующее ему критическое скольжение s_k :

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 \left(r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + x_k^2}\right)}. \quad (3.22)$$

Отношение максимального момента к номинальному называется перегрузочной способностью асинхронного двигателя:

$$\lambda = \frac{M_k}{M_H}. \quad (3.23)$$

Критическое скольжение

$$s_k = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}, \quad (3.24)$$

где знак «+» означает, что эта величина относится к двигательному режиму, знак «-» — к генераторному режиму рекуперативного торможения.

С учетом (3.22) и (3.23) формулу (3.19) можно преобразовать к более удобному для пользования выражению — формуле Клосса:

$$M = \frac{2M_k(1 + as_k)}{s_k/s + s/s_k + 2as_k}, \quad (3.25)$$

где $a = r_1/r'_2$.

Для двигателей мощностью более 15 кВт сопротивление r_1 невелико и при частоте 50 Гц значительно меньше x_k . Поэтому в приведенных выше выражениях величиной r_1 можно пренебречь. Тогда

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 x_k}, \quad (3.26)$$

$$s_k = \frac{r'_2}{x_k}, \quad \text{или} \quad s_k = s_n \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right), \quad (3.27)$$

где s_n — номинальное скольжение.

Если пренебречь r_1 , то формула Клосса будет иметь вид

$$M = \frac{2M_k}{s_k/s + s/s_k}. \quad (3.28)$$

По формулам (3.27) и (3.28) можно рассчитать механическую характеристику асинхронного двигателя, пользуясь его паспортными данными, зная номинальный момент M_n , номинальное скольжение s_n и перегрузочную способность двигателя λ .

Проанализируем особенности механической характеристики асинхронного двигателя (см. рис. 3.5). Она носит нелинейный характер и состоит из двух частей. Первая — рабочая часть — в пределах скольжения от 0 до s_k . Эта часть характеристики близка к линейной и имеет отрицательную жесткость. Здесь момент, развиваемый двигателем, примерно пропорционален токам статора I_1 и ротора I_2 . Так как на этой части характеристики $s < s_k$, то второе слагаемое знаменателя в формуле (3.28) существенно меньше первого, и им можно пренебречь. Тогда рабочую часть механической характеристики можно приближенно представить в линейной форме, где момент пропорционален скольжению:

$$M = \frac{2M_k}{s_k} s, \quad \text{или} \quad M = \frac{M_n}{s_n} s. \quad (3.29)$$

Вторая часть механической характеристики асинхронного двигателя при $s > s_k$ — криволинейная, с положительным значением

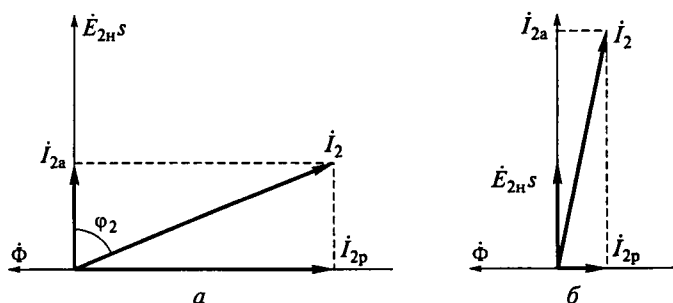


Рис. 3.7. Векторная диаграмма цепи ротора асинхронного двигателя: *а* — при большом скольжении; *б* — при малом скольжении

жесткости β . Несмотря на то что ток двигателя по мере роста скольжения увеличивается, момент, напротив, уменьшается. Если обмотки ротора асинхронного двигателя с фазным ротором во внешней цепи замкнуты накоротко, то пусковой ток такого двигателя при $\omega = 0$ и $s = 1$ будет очень большим и превысит номинальный в 10—12 раз. В то же время пусковой момент составит порядка 0,4...0,5 номинального момента.

Для объяснения несоответствия между пусковым током и моментом рассмотрим векторные диаграммы цепи ротора (рис. 3.7) для двух случаев: 1) когда скольжение велико, что соответствует пусковой части характеристики (рис. 3.7, *а*); 2) когда скольжение мало, что соответствует рабочей части характеристики (рис. 3.7, *б*). При пуске, когда $s = 1$, частота тока ротора равна частоте питающей сети ($f_2 = 50$ Гц). Индуктивное сопротивление обмотки ротора (см. (3.10)) велико и существенно превосходит активное сопротивление ротора r_2 , ток отстает от ЭДС ротора на большой угол φ_2 , т.е. ток ротора в основном реактивный I_{2p} . Поскольку ЭДС ротора в этом случае будет велика $E_{2s=1} = E_{2H}$, то и пусковой ток будет очень большим, однако из-за малого значения $\cos \varphi_2$ активная составляющая тока ротора I_{2a} будет невелика, а следовательно, момент, развиваемый двигателем, будет также невелик.

При разгоне двигателя скольжение уменьшается, ЭДС ротора, частота тока ротора и индуктивное сопротивление ротора пропорционально уменьшаются. Соответственно уменьшается полный ток ротора и статора, однако вследствие повышения $\cos \varphi_2$ активная составляющая тока ротора растет и возрастает момент двигателя.

Когда скольжение двигателя станет меньше s_k , то частота тока ротора уменьшится настолько, что индуктивное сопротивление станет уже меньше активного и ток ротора будет практически активным (см. рис. 3.7, *б*), момент двигателя будет пропорционален току ротора. Так, если номинальное скольжение двигателя $s_H = 2\%$,

то частота тока ротора уменьшится в 50 раз по сравнению с частотой тока при пуске, соответственно уменьшится индуктивное сопротивление ротора. Поэтому, несмотря на то что ЭДС ротора также уменьшится в 50 раз, она будет достаточной для создания номинального тока ротора, обеспечивающего номинальный момент двигателя. Таким образом, своеобразие механической характеристики асинхронного двигателя определяется зависимостью индуктивного сопротивления ротора от скольжения.

3.2.3. Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором

Исходя из изложенного ранее, для пуска асинхронного двигателя с фазным ротором нужно принять меры для увеличения пускового момента и снижения пусковых токов. С этой целью в цепь ротора включают добавочное активное сопротивление. Как следует из формул (3.22), (3.24), введение добавочного активного сопротивления не изменяет максимального момента двигателя, а лишь изменяет критическое скольжение:

$$s_k = \frac{r'_2 + R'_{2д}}{x_k}, \quad (3.30)$$

где $R_{2д}$ — приведенное к статору добавочное сопротивление в цепи ротора.

Введение добавочного активного сопротивления увеличивает полное сопротивление роторной цепи, в результате чего уменьшается пусковой ток и увеличивается $\cos \varphi_2$ роторной цепи, вследствие этого увеличивается активная составляющая тока ротора и, следовательно, — пусковой момент двигателя.

Обычно в роторную цепь двигателя с фазным ротором вводят секционированный резистор, ступени которого переключают пусковыми контакторами. Расчет реостатных пусковых характеристик можно проводить по формуле (3.25), используя значение s_k , соответствующее сопротивлению $R_{2доб}$ для каждой ступени пускового резистора.

Схема включения пусковых резисторов и соответствующие реостатные механические характеристики двигателя с фазным ротором показаны на рис. 3.8. Механические характеристики имеют общую точку идеального холостого хода, равную скорости электромагнитного поля статора ω_0 , а жесткость рабочей части характеристик уменьшается по мере возрастания суммарного активного сопротивления роторной цепи ($r_2 + R_{доб}$).

При пуске двигателя сначала вводят полное добавочное сопротивление $R_{1доб}$ (рис. 3.8, а). По достижении скорости, при которой момент двигателя M_1 становится близким к моменту сопротивле-

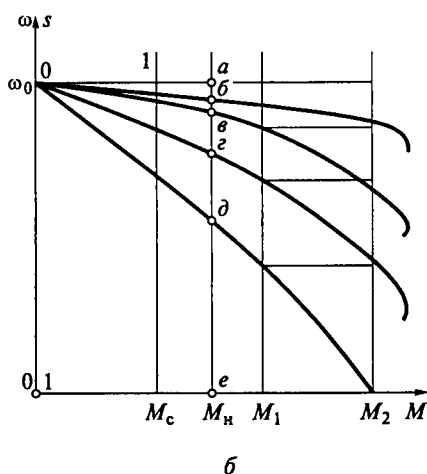
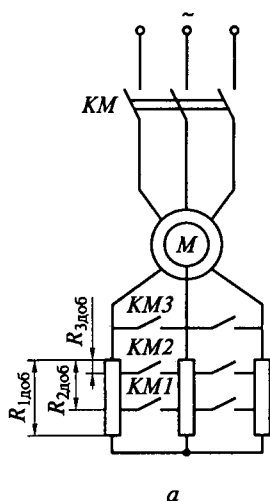


Рис. 3.8. Схема включения пусковых резисторов (а) и реостатные механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором (б)

ния M_c , часть пускового резистора шунтируют контактором $KM1$, и двигатель переходит на характеристику, соответствующую добавочному сопротивлению $R_{2доб}$. При этом момент двигателя увеличивается до M_2 . По мере дальнейшего разгона двигателя контактором $KM2$ закорачивается вторая ступень пускового резистора. После замыкания контактов контактора $KM3$ двигатель переходит на естественную характеристику и будет работать со скоростью, соответствующей точке 1 (рис. 3.8, б).

Добавочные сопротивления легко определить графически. Проведем линию номинального момента двигателя и отметим точки пересечения этой линии с механическими характеристиками. Тогда отрезки, заключенные между точками, будут пропорциональны сопротивлениям ступеней.

Полное сопротивление добавочного резистора $R_{1доб} = R_{2н}(\delta\partial/ae)$. Сопротивление первой ступени резистора

$$R_{1доб} - R_{2доб} = R_{2н}(\varepsilon\partial/ae).$$

Сопротивление второй ступени резистора

$$R_{2доб} - R_{3доб} = R_{2н}(\varepsilon\delta/ae).$$

Сопротивление третьей ступени резистора $R_{3доб} = R_{2н}(\delta\varepsilon/ae)$.

Отрезок ab пропорционален сопротивлению обмотки фазы ротора:

$$r_2 = R_{2н}(ab/ae).$$

В приведенных соотношениях $R_{2н}$ — номинальное сопротивление ротора, которое определяют по формуле

$$R_{2н} = \frac{E_{2н.лин}}{\sqrt{3}I_{2н}},$$

где $E_{2н.лин}$ — линейная ЭДС ротора при $s = 1$; $I_{2н}$ — номинальный ток ротора.

Пример 3.1. Рассчитать естественную механическую характеристику асинхронного двигателя МТН611-6 с фазным ротором типа краново-металлургической серии и построить пусковые характеристики при реостатном пуске в три ступени.

Задача — определить пусковые сопротивления.

Технические данные двигателя: номинальная мощность при работе в длительном режиме $P_n = 75$ кВт; номинальная частота вращения $n_n = 950$ мин⁻¹; напряжение статора $U_1 = 380$ В; номинальное напряжение на кольцах ротора $E_{2н.лин} = 270$ В; максимальный момент двигателя $M_k = 2610$ Н·м; номинальный ток ротора $I_{2н} = 108$ А; синхронная частота вращения $n_0 = 1000$ мин⁻¹. Момент сопротивления на валу двигателя при пуске следует принять равным номинальному моменту двигателя.

Номинальный момент двигателя

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{75\,000}{99,4} = 754 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = 99,4 \text{ с}^{-1}$.

Перегрузочная способность двигателя

$$\lambda = \frac{M_k}{M_n} = \frac{2610}{754} = 3,46.$$

Номинальное скольжение

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0,05.$$

Критическое скольжение на естественной характеристике

$$s_k = s_n \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,05 \left(3,46 + \sqrt{3,46^2 - 1} \right) = 0,33.$$

Естественную характеристику рассчитаем по формуле

$$\frac{M}{M_n} = \frac{2\lambda}{s_k/s + s/s_k}.$$

Расчетные данные приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Расчетные данные

s	1	0,8	0,6	0,4	0,33	0,2	0,1	0,05
s/s_k	3,0	2,42	1,81	1,21	1	0,6	0,3	0,15
s_k/s	0,33	0,41	0,55	0,82	1	1,65	3,3	6,6
M/M_n	2,07	2,44	2,93	3,4	3,46	3,21	1,92	1,0

Построенная по расчетным данным естественная механическая характеристика представлена на рис. 3.9.

Для расчета пусковых характеристик нужно задаться значениями момента M_1 , при котором происходит переключение ступеней пускового реостата: $M_1 = 1,2 M_n$. Пусковые значения момента M_2 находят по формуле

$$M_2 = \lambda' M_1.$$

$$\text{Здесь } \lambda' = \sqrt[m+1]{\frac{1}{s_n (M_1/M_n)}} = \sqrt[4]{\frac{1}{0,05 \cdot 1,2}} = 2,$$

где m — число ступеней;

$$M_2 = 2 \cdot 1,2 M_n = 2,4 M_n, \text{ при этом } M_2 < M_k.$$

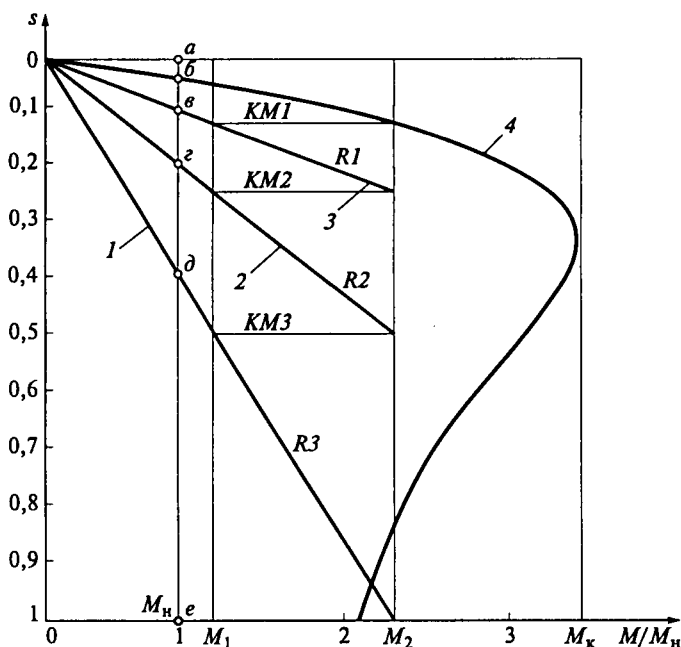


Рис. 3.9. Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором:

1...3 — пусковые; 4 — естественная

Построение пусковых механических характеристик проведем, полагая, что при моментах от 0 до $M_1 = 2,4 M_n$, т.е. на рабочем участке характеристик они носят прямолинейный характер. Первую пусковую характеристику, соответствующую сопротивлению полностью включенного в цепь ротора пускового резистора, строим, соединяя точки с координатами ($s = 0, M = 0$) и ($s = 1, M = M_2$). На этой характеристике двигатель разгоняется до скорости (скольжения), соответствующей точке пересечения первой пусковой характеристики с линией переключающего момента M_1 . После этого часть пускового резистора закорачивается контактором KMI (см. рис. 3.8) и двигатель переходит на работу на второй пусковой характеристике. Соединив найденную точку на линии пиковых моментов M_2 с точкой холостого хода, строим вторую пусковую характеристику. Аналогично найдем третью пусковую характеристику.

Ранее было показано, как определить сопротивления пускового резистора графическим путем. Можно определять сопротивления пускового резистора по ступеням аналитически, как это было выполнено при решении данной задачи.

Для расчета сопротивлений пускового резистора по ступеням найдем номинальное сопротивление ротора:

$$R_{2н} = \frac{E_{2н.лин}}{\sqrt{3} \cdot I_{2н}} = \frac{270}{\sqrt{3} \cdot 108} = 1,44 \text{ Ом.}$$

Сопротивление третьей ступени резистора

$$R_{3доб} = R_{2н} s_n (\lambda' - 1) = 1,44 \cdot 0,05 (2 - 1) = 0,072 \text{ Ом.}$$

Сопротивление второй ступени резистора

$$R_{2доб} - R_{3доб} = R_{3доб} \lambda' = 0,072 \cdot 2 = 0,144 \text{ Ом.}$$

Сопротивление первой ступени резистора

$$R_{1доб} - R_{2доб} = (R_{2доб} - R_{3доб}) \lambda' = 0,144 \cdot 2 = 0,288 \text{ Ом.}$$

Полное добавочное сопротивление

$$R_{1доб} = 0,228 + 0,144 + 0,072 = 0,504 \text{ Ом.}$$

3.2.4. Особенности характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Формирование пусковых характеристик двигателей с фазным ротором проводится путем введения в цепь ротора дополнительного активного сопротивления и уменьшения его по мере разгона двигателя (уменьшения скольжения).

В короткозамкнутых асинхронных двигателях введение дополнительного сопротивления в цепь ротора невозможно. Однако тот

же результат может быть получен, если воспользоваться эффектом вытеснения тока на поверхность проводника. Сущность этого явления состоит в следующем. Согласно закону электромагнитной индукции при протекании по проводнику переменного тока в нем индуцируется ЭДС самоиндукции, направленная навстречу току

$$e_L = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = -L\omega I_m \cos \omega t, \quad (3.31)$$

$$\text{или } e_L = -2\pi f L I_m \cos \omega t,$$

где L — индуктивность проводника; I_m — амплитудное значение тока.

Значение этой ЭДС зависит от значения тока I_m , его частоты и индуктивности, определяемой характеристикой среды, окружающей проводник. Если проводник находится на воздухе, то магнитная проницаемость среды очень мала, следовательно, мала индуктивность L . В этом случае при частоте 50 Гц ($\omega = 314 \text{ с}^{-1}$) влияние ЭДС самоиндукции незначительно. Если проводник помещен в тело магнитопровода, индуктивность многократно увеличивается и ЭДС самоиндукции, направленная навстречу току, играет роль индуктивного сопротивления, препятствующего протеканию тока.

Рассмотрим проявление действия ЭДС самоиндукции для случая проводника (стержня обмотки ротора), помещенного в глубокий паз магнитопровода ротора двигателя (рис. 3.10, а). Условно разделим сечение стержня на три части, которые соединены параллельно. Ток, протекающий по нижней части стержня, образу-

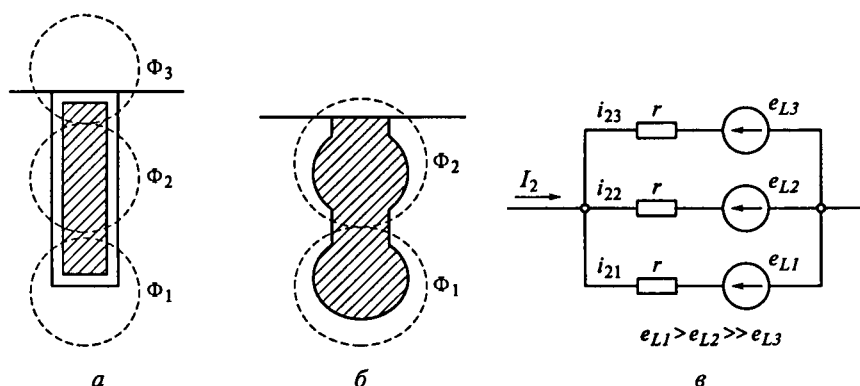


Рис. 3.10. Конструкция ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя: а — с глубоким пазом; б — с двойной клеткой; в — схема, поясняющая эффект вытеснения тока

ет поток Φ_1 , магнитные силовые линии которого замыкаются по магнитопроводу. В этой части проводника возникает ЭДС самоиндукции e_{L1} большого значения, направленная навстречу току i_{21} .

Ток i_{23} , протекающий по верхней части стержня роторной обмотки, образует поток Φ_3 , но так как силовые линии этого потока в значительной части своей длины замыкаются по воздуху, то поток Φ_3 будет гораздо меньше потока Φ_1 . Следовательно, ЭДС e_{L3} будет во много раз меньше, чем e_{L1} .

Указанное распределение ЭДС самоиндукции по высоте стержня характерно для того режима, при котором частота тока ротора близка к 50 Гц. В этом случае, поскольку все три части стержня ротора соединены параллельно (рис. 3.10, *в*), то ток ротора I_2 пойдет по верхней части стержня. Это явление называют вытеснением тока на поверхность паза. При этом эффективное сечение стержня, по которому идет ток, будет в несколько раз меньше, чем общее сечение стержня обмотки ротора. Таким образом, увеличивается активное сопротивление ротора r_2 . Отметим, что поскольку ЭДС самоиндукции зависит от частоты тока (т.е. от скольжения), то и сопротивления r_2 и x_2 являются функциями скольжения.

При пуске, когда скольжение велико, сопротивление r_2 увеличивается (в цепь ротора как бы вводится добавочный резистор). По мере разгона двигателя скольжение двигателя уменьшается, эффект вытеснения тока ослабевает, появляется сначала ток i_{22} , затем i_{21} , т.е. ток начинает распространяться вниз по сечению проводника, сопротивление r_2 уменьшается. При достижении рабочей скорости частота тока ротора настолько мала, что явление вытеснения тока уже не сказывается, ток протекает по всему сечению проводника и сопротивление r_2 минимально. Благодаря такому автоматическому изменению сопротивления r_2 пуск асинхронных короткозамкнутых двигателей протекает благоприятно: пусковой ток составляет 5,0...6,0 номинального, а пусковой момент — 1,1...1,3 номинального.

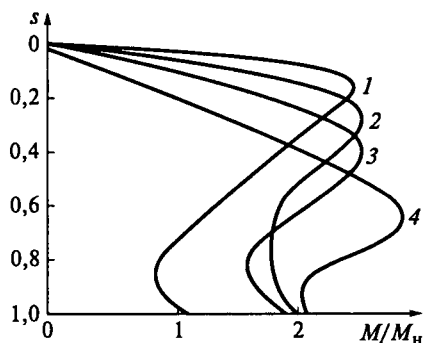
Варьировать параметры пусковой характеристики асинхронного двигателя при конструировании можно, меняя форму паза, а также сопротивление материала стержней (состав сплава). Наряду с глубокими пазами применяют двойные пазы, образующие двойную «беличью клетку» (рис. 3.10, *б*), пазы грушевидной формы и др.

На рис. 3.11 представлены примерные механические характеристики для серий асинхронных короткозамкнутых двигателей.

Короткозамкнутые двигатели нормального исполнения используют для привода широкого класса рабочих машин и механизмов, прежде всего для приводов, работающих в длительном режиме. Для этого исполнения характерны высокий КПД и минимальное номинальное скольжение. Механическая характеристика в области больших скольжений имеет обычно небольшой «провал», характеризующийся минимальным моментом $M_{\min}$.

Рис. 3.11. Примерные механические характеристики асинхронных короткозамкнутых двигателей:

1 — нормального исполнения; 2 — с повышенным пусковым моментом; 3 — с повышенным скольжением; 4 — краново-металлургических серий



Двигатели с повышенным скольжением имеют более «мягкую» механическую характеристику и используются в следующих случаях: когда два или более двигателя работают на общий вал; для механизмов (например, кривошипно-шатунных) с циклически изменяющейся нагрузкой, когда для преодоления сопротивления движению целесообразно использовать кинетическую энергию, запасаемую в движущихся частях электропривода; и для механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме.

Двигатели с повышенным пусковым моментом предназначены для механизмов с тяжелыми условиями пуска, например для скребковых конвейеров. Двигатели краново-металлургических серий предназначены для механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками. Эти двигатели имеют большую перегрузочную способность, высокий пусковой момент, повышенную механическую прочность, но худшие энергетические показатели, чем у двигателей нормального исполнения.

Аналитический расчет механических характеристик короткозамкнутых асинхронных двигателей достаточно сложен, поэтому приближенно характеристику можно построить по четырем точкам: при холостом ходе ($s = 0$), при максимальном (M_k), пусковом (M_p) и минимальном ($M_{\min}$) моментах. Данные этих характерных точек приводятся в каталогах и справочниках для асинхронных двигателей. Расчет рабочей части механической характеристики короткозамкнутого асинхронного двигателя (при скольжениях от 0 до s_k) можно проводить по формуле Клосса (3.25), (3.28), поскольку эффект вытеснения тока в рабочем режиме почти не проявляется.

3.2.5. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя при работе в двигательном режиме

Работе в двигательном режиме соответствует скольжение $s = 1 \dots 0$, причем рабочим режимом является диапазон скоростей, при которых $s \leq s_k$. В диапазоне скольжения $s = s_k \dots 1$ потери в

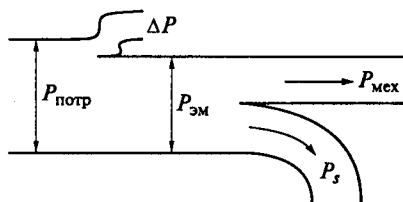


Рис. 3.12. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

роторе двигателя существенно возрастают, поэтому на этом участке механической характеристики двигатель работает только во время пуска.

Проведем анализ распределения потоков электрической энергии при различных значениях скольжения асинхронного двигателя.

На рис. 3.12 представлена энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

Мощность $P_{\text{потр}}$, потребляемая двигателем, за исключением потерь в обмотках и стали статора (ΔP_1) преобразуется в мощность вращающегося магнитного поля — электромагнитную мощность $P_{\text{эм}}$. Поскольку асинхронный двигатель работает одновременно и как двигатель, и как трансформатор, то электромагнитная мощность разделяется на два канала. Одна часть электромагнитной мощности преобразуется в механическую мощность $P_{\text{мех}}$, создаваемую на валу асинхронного двигателя. Эта мощность возникает как результат взаимодействия вращающегося электромагнитного поля с активной составляющей тока ротора. Другая часть электромагнитной мощности трансформируется в виде электрической мощности в обмотку ротора как во вторичную обмотку трансформатора.

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = M\omega_0, \quad (3.32)$$

где M — момент на валу асинхронного двигателя; ω_0 — скорость поля статора.

Электромагнитная мощность разделяется на две составляющие — механическую мощность $P_{\text{мех}}$ и электрическую мощность P_s :

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{мех}} + P_s. \quad (3.33)$$

Механическая мощность

$$P_{\text{мех}} = M\omega. \quad (3.34)$$

Как следует из (3.32) и (3.34), электрическая мощность, трансформируемая в обмотки ротора,

$$P_s = P_{\text{эм}} - P_{\text{мех}} = M\omega_0 - M\omega = Ms_{\text{абс}} = M\omega_0 s. \quad (3.35)$$

Отсюда следует, что P_s — мощность скольжения, выделяемая в обмотках ротора, — пропорциональна моменту на валу двигателя и его скольжению. Эта мощность рассеивается в виде потерь в обмотках ротора двигателя (для фазных двигателей во время пуска — также в пусковых резисторах).

При проектировании и использовании асинхронных двигателей стремятся уменьшить мощность скольжения, чтобы уменьшить потери электроэнергии, снизить нагрев двигателя и повысить его КПД. Асинхронные двигатели конструируют таким образом, чтобы номинальное относительное скольжение составляло всего несколько процентов.

Для экономичной эксплуатации асинхронных электроприводов важным условием является работа с минимальным скольжением. Это правило должно выдерживаться и для регулируемых асинхронных электроприводов. Исключения составляют каскадные схемы включения асинхронного двигателя с фазным ротором, где мощность скольжения используется полезно.

3.2.6. Изменение напряжения питания асинхронного двигателя

Поток асинхронного двигателя пропорционален напряжению питания U_1 , ЭДС ротора, а следовательно, и ток ротора I_2 также пропорциональны напряжению статора. Поэтому момент асинхронного двигателя, в том числе максимальный момент, пропорциональны U_1^2 (см. (3.19), (3.22)). Следовательно, недопустимо значительно снижать напряжение питания при пуске и работе асинхронного двигателя. Так, при снижении напряжения питания на 30 % его максимальный момент уменьшится примерно в 2 раза и при значительном статическом моменте двигатель может «опрокинуться», т. е. остановиться и оказаться под пусковым током. Этот режим является для двигателя аварийным. Такая же ситуация может сложиться, если напряжение питания снижено при пуске двигателя под нагрузкой. Указанные случаи имеют место в маломощных электрических сетях, что обуславливает большую аварийность асинхронных короткозамкнутых двигателей. Во избежание этого должны предусматриваться необходимые защитные средства, предотвращающие длительное нахождение асинхронного двигателя под пусковым током.

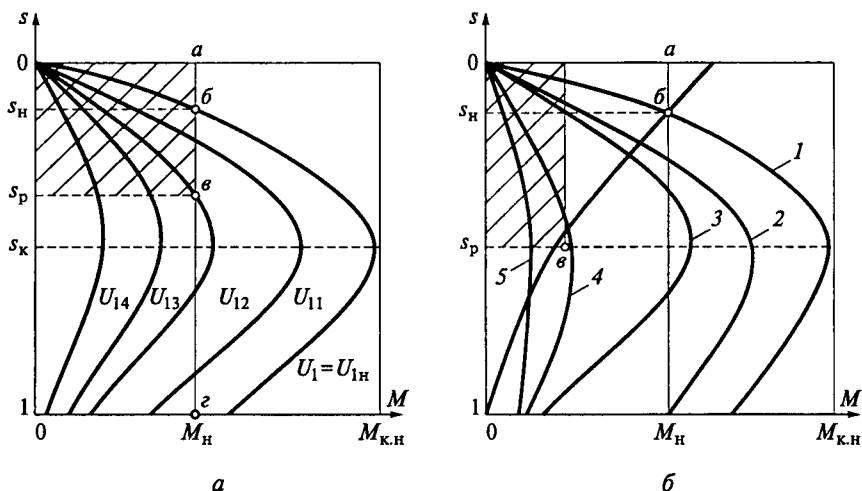


Рис. 3.13. Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании напряжения питания:
 а — при постоянном моменте; б — при вентиляторном моменте нагрузки; 1 — естественная характеристика; 2...5 — регулировочные характеристики

В то же время снижение напряжения, подаваемого на статорные обмотки, иногда используется для регулирования скорости асинхронного двигателя и для обеспечения плавности пуска.

При регулировании скорости асинхронного двигателя путем изменения напряжения питания возможен перегрев его ротора, и это регулирование может проводиться лишь при определенных условиях:

- малом диапазоне снижения скорости относительно номинальной;
- моменте сопротивления на валу двигателя, которое меньше номинального;
- использовании двигателя с повышенным скольжением.

Рассмотрим механические характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя с повышенным скольжением при регулировании напряжения статора (рис. 3.13). При снижении напряжения U_1 относительное критическое скольжение двигателя s_k и скорость идеального холостого хода ω_0 остаются постоянными, а максимальный момент M_k двигателя уменьшается по сравнению с номинальным критическим $M_{к.н}$ примерно пропорционально квадрату снижения напряжения. Соответственно снижается жесткость рабочей части механической характеристики двигателя. Регулирование скорости возможно в диапазоне от ω_0 до $\omega_0(1 - s_k)$.

Предположим, что момент сопротивления на валу двигателя остается постоянным и равным номинальному: $M_c = M_n$. При

снижении напряжения до U_{12} (рис. 3.13, а) двигатель переходит на регулировочную характеристику и будет работать со скоростью $\omega_0(1 - s_p)$ и скольжением s_p . Как следует из (3.35), мощность скольжения P_s , выделяемая в виде потерь в роторе двигателя, будет равна $P_s = M_n \omega_0 s_p$ и пропорциональна заштрихованной площади прямоугольника $0ab s_p$. Электромагнитная мощность $P_{эм} = M_c \omega_0$ пропорциональна площади $0aa_1 l$, полезная мощность на валу двигателя $M_{мех} = M_c \omega = M_c \omega_0(1 - s_p)$ будет пропорциональна площади $s_p b_1 l$.

Номинальная мощность скольжения, на рассеяние которой рассчитана конструкция двигателя, пропорциональна площади $0ab s_n$. Сравним эту площадь с заштрихованной площадью ($0ab s_p$), которая характеризует потери в роторе двигателя при работе в точке b . Она примерно в 3 раза больше, т.е. потери при работе в точке b в 3 раза превосходят номинальные потери в роторе. Естественно, что при длительной работе в указанном режиме ротор двигателя будет перегреваться и двигатель выйдет из строя. Для того чтобы можно было применить данный способ регулирования, нужно установленную мощность двигателя повысить в 3 раза или применить специальную конструкцию интенсивного теплоотвода.

Поэтому регулирование скорости изменением напряжения питания возможно в том случае, когда момент сопротивления M_c при снижении скорости существенно меньше номинального. Такой способ регулирования применяется иногда для привода насосов и вентиляторов, у которых момент сопротивления на валу резко снижается при уменьшении скорости (рис. 3.13, б). Поскольку со снижением скорости момент M_c уменьшается пропорционально квадрату снижения скорости, то мощность скольжения P_s со снижением скорости растёт не столь существенно. Если нагрузка на валу двигателя носит вентиляторный характер, то максимальная мощность скольжения составляет 15 % от мощности на валу при номинальной скорости. Поэтому для привода вентиляторов и насосов достаточно увеличение установленной мощности двигателя с повышенным скольжением в 1,5—2 раза.

Снижение напряжения на статоре асинхронного двигателя иногда используется для уменьшения пусковых токов двигателя. Это возможно, если момент сопротивления на валу двигателя при пуске не превышает $0,3 \dots 0,4 M_n$ (насосы, вентиляторы или другие рабочие машины, пуск которых проводится вхолостую). В этом случае посредством тиристорного регулятора напряжение, подводимое к обмотке статора, снижается, а затем по мере разгона двигателя увеличивается до номинального значения. Этим обеспечивается плавный пуск двигателя с уменьшенными пусковыми токами и сниженными динамическими нагрузками на рабочую машину.

3.2.7. Тормозные режимы асинхронных двигателей

Полная механическая характеристика асинхронного двигателя в поле « $M-s$ » представлена на рис. 3.14.

Асинхронный двигатель может работать в трех тормозных режимах: рекуперативного торможения, динамического торможения и торможения противовключением; специфическим тормозным режимом является конденсаторное торможение.

Рекуперативное генераторное торможение возможно, когда скорость ротора выше скорости электромагнитного поля статора, чему соответствует отрицательное скольжение:

$$\text{при } \omega > \omega_0 \quad s < 0.$$

Для того чтобы скорость ротора двигателя превысила синхронную скорость и ротор разогнался до скорости выше синхронной, к его валу должен быть приложен внешний, совпадающий со знаком скорости вращающий момент. Это возможно, например, в приводе подъемной лебедки в режиме спуска груза.

Механическая характеристика асинхронного двигателя в режиме рекуперативного торможения идентична (с учетом угловой симметрии) характеристике двигателя в двигательном режиме. Расчет характеристик может производиться по формуле Клосса (3.25).

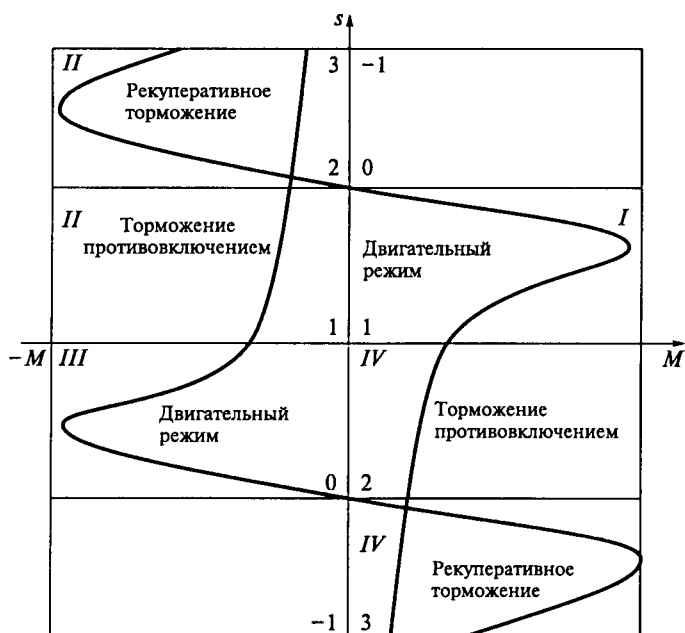


Рис. 3.14. Полная механическая характеристика асинхронного двигателя

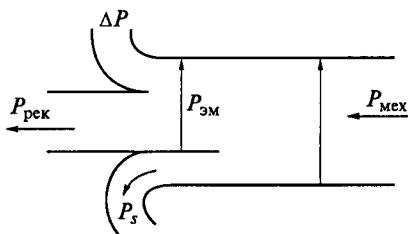


Рис. 3.15. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя в режиме рекуперативного торможения

Максимальный момент в режиме рекуперативного торможения $M_{к.г}$ несколько выше, чем максимальный момент в двигательном режиме. Для рекуперативного режима

$$M_{к.г} = \frac{3U_1^2}{2\omega_0(r_1 - \sqrt{r_1^2 + x_k^2})}.$$

Несколько большее значение максимального момента в генераторном режиме объясняется тем, что потери в статоре (на сопротивлении r_1) в двигательном режиме уменьшают момент на валу, а в генераторном режиме момент на валу должен быть больше, чтобы покрыть потери в статоре.

Энергетический баланс в режиме рекуперативного генераторного торможения (рис. 3.15) определяется следующими причинами. Механическая мощность, поступающая на вал двигателя, преобразуется в электромагнитную мощность вращающегося поля $P_{эм}$ и электрическую мощность, трансформируемую в роторную цепь двигателя. По аналогии с (3.33) получим

$$P_{мех} = P_{эм} - P_s = M\omega_0 - M\omega_0 s.$$

Электромагнитная мощность, за исключением потерь в статоре, отдается в питающую сеть, а мощность скольжения рассеивается в роторной цепи. Отметим, что в режиме рекуперативного торможения асинхронный двигатель генерирует и отдает в сеть активную мощность, а для создания электромагнитного поля асинхронный двигатель и в режиме генератора должен обмениваться с сетью реактивной мощностью. Поэтому асинхронная машина не может работать как автономный генератор при отключении от сети. Возможно, однако, подключение асинхронной машины к конденсаторным батареям как к источнику реактивной мощности (см. рис. 3.19).

Способ динамического торможения характеризуется тем, что статорные обмотки отключаются от сети переменного тока и подключаются к источнику постоянного напряжения (рис. 3.16).

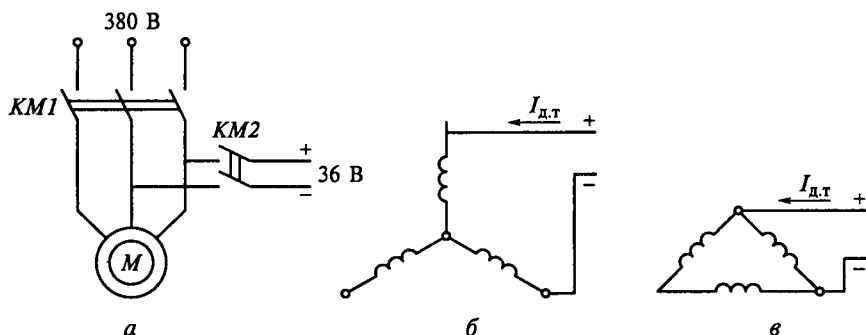


Рис. 3.16. Схемы динамического торможения асинхронного двигателя: *а* — схема включения динамического торможения; *б* — при соединении обмоток в звезду; *в* — при соединении обмоток в треугольник

При питании обмоток статора постоянным током создается неподвижное в пространстве электромагнитное поле, т.е. скорость поля статора $\omega_{\text{од.т}} = 0$. Скольжение

$$s_{\text{д.т}} = -\omega / \omega_{0\text{н}},$$

где $\omega_{0\text{н}}$ — номинальная скорость поля статора.

Механические характеристики в режиме динамического торможения (рис. 3.17) подобны характеристикам в режиме рекуперативного торможения. Исходной точкой характеристик является начало координат. Регулировать интенсивность динамического тор-

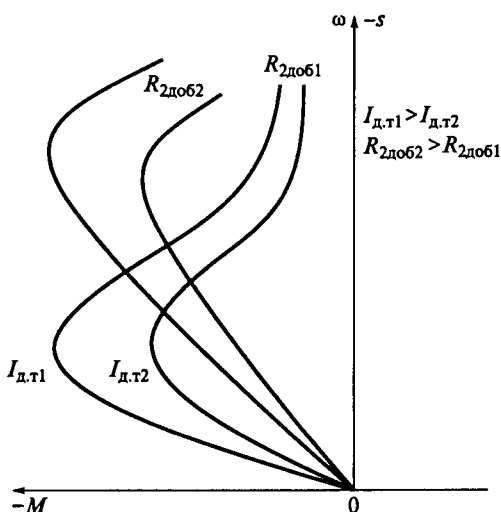


Рис. 3.17. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

можения можно изменяя значение тока возбуждения $I_{д.т}$ в обмотках статора. Чем выше ток, тем больший тормозной момент развивает двигатель. При этом, однако, нужно учитывать, что при $I_{д.т} > I_{н}$ начинается насыщение магнитной цепи двигателя.

Для асинхронных двигателей с фазным ротором регулирование тормозного момента может проводиться также введением дополнительного резистора в цепь ротора. Эффект от введения добавочного резистора такой же, как при пуске асинхронного двигателя: благодаря увеличению $\cos \varphi_2$ повышается критическое скольжение двигателя и увеличивается тормозной момент при больших скоростях.

Работу асинхронного двигателя в режиме динамического торможения можно рассматривать как работу трехфазного асинхронного двигателя при питании его постоянным током, т.е. током при частоте $f_1 = 0$. При этом на обмотки статора питание поступает не от источника напряжения, а от источника тока. Следует также иметь в виду, что в схеме динамического торможения ток $I_{д.т}$ протекает (при соединении обмоток в звезду) не по трем, а по двум фазным обмоткам.

Для расчета характеристик нужно заменить реальный ток $I_{д.т}$ эквивалентным током $I_{экр}$, который, протекая по трем фазным обмоткам, создает ту же намагничивающую силу, что и ток $I_{д.т}$.

Для схемы на рис. 3.16, б — $I_{экр} = 0,816 I_{д.т}$.

Для схемы на рис. 3.16, в — $I_{экр} = 0,472 I_{д.т}$.

С учетом указанных особенностей векторная диаграмма асинхронной машины в режиме динамического торможения (рис. 3.18) будет определяться соотношением:

$$\dot{I}_{\mu} = \dot{I}_{экр} + \dot{I}'_2,$$

где $\dot{I}_{\mu}$ — ток намагничивания.

Ток намагничивания $\dot{I}_{\mu}$ зависит от тока ротора при постоянном токе $\dot{I}_{экр}$. По мере роста скольжения ток намагничивания будет уменьшаться под действием реактивного тока ротора. При $\dot{I}'_2 = 0$ ток намагничивания при холостом ходе $\dot{I}_{\mu} = \dot{I}_{экр}$.

Упрощенная формула для приближенного расчета механических характеристик (не учитывающая насыщение двигателя) подобна формуле Клосса для двигательного режима:

$$M = \frac{2M_{д.т.к}}{s_{д.т} / s_{д.т.к} + s_{д.т.к} / s_{д.т}},$$

где $M_{д.т.к}$ — критический момент в режиме динамического тормо-

жения, $M_{д.т.к} = -\frac{3x_{\mu}^2 I_{экр}^2}{2\omega_0(x'_2 + x_{\mu})}$; $s_{д.т.к}$ — критическое скольжение в

режиме динамического торможения, $s_{д.т.к} = \frac{r'_2 + R'_{2доб}}{x'_2 + x_{\mu}}$.

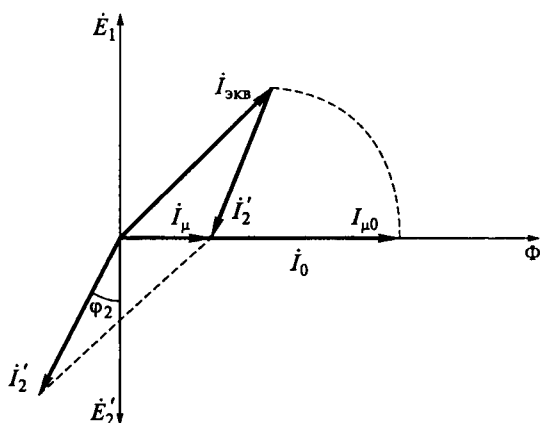


Рис. 3.18. Векторная диаграмма асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

Следует подчеркнуть, что критическое скольжение в режиме динамического торможения существенно меньше критического скольжения в двигательном режиме, так как $x_{\mu} \gg x_k$. Для получения максимального тормозного момента, равного максимальному моменту в двигательном режиме, ток $I_{\text{экв}}$ должен быть в 2—4 раза выше номинального тока намагничивания I_0 . Напряжение источника питания постоянного тока будет значительно меньше номинального напряжения $U_{\text{д.т}} \approx (2,5 \dots 4) I_{\text{экв}} r_1$.

Энергетически в режиме динамического торможения асинхронный двигатель работает как синхронный генератор, нагруженный на сопротивление роторной цепи двигателя. Вся механическая мощность, поступающая на вал двигателя, при торможении преобразуется в электрическую и идет на нагрев резисторов роторной цепи.

Возбуждение асинхронной машины в режиме динамического торможения может осуществляться не только подачей постоянного тока в обмотки статора машины, но также в режиме самовозбуждения путем подключения конденсаторов к цепям статора асинхронной машины (рис. 3.19). Такой способ торможения называют конденсаторным торможением асинхронных двигателей. По энергетической сущности этот способ торможения идентичен динамическому торможению, так как энергия, поступающая с вала, преобразуется в электрическую и выделяется в виде потерь в роторе двигателя.

Самовозбуждение асинхронного двигателя происходит следующим образом. Под действием остаточного потока ротора в обмотках статора наводится ЭДС, что приводит к возникновению намагничивающего тока, протекающего через конденсаторы. При

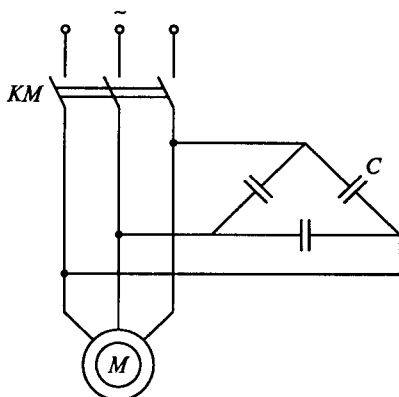


Рис. 3.19. Схема включения асинхронного двигателя в режиме динамического торможения с самовозбуждением от конденсаторов

этом увеличивается поток машины, а следовательно, — наводимая ЭДС и ток намагничивания. Верхняя и нижняя границы режима самовозбуждения и тормозной момент зависят от емкости конденсаторов. Данный способ торможения применяется для приводов малой мощности (до 5 кВт), так как требует установки конденсаторов значительной емкости.

Торможение противовключением может быть в двух случаях:

- 1) когда при работе двигателя необходимо его экстренно остановить, с этой целью меняют порядок чередования фаз питания обмоток статора двигателя (включение «Вперед» и «Назад»);
- 2) когда электромеханическая система движется под действием спускаемого груза, а двигатель включается в направлении подъема, чтобы ограничить скорость спуска (режим протягивающего груза).

В обоих случаях электромагнитное поле статора и ротор двигателя вращаются в разные стороны. Скольжение двигателя в режиме противовключения всегда больше единицы:

$$s_{п.в} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} > 1.$$

В первом случае (рис. 3.20) двигатель, работавший в точке 1, после изменения порядка чередования фаз двигателя переходит в тормозной режим в точке 1', и скорость привода быстро снижается под действием тормозного момента M_t и момента сопротивления M_c . Когда скорость близка к нулю, двигатель необходимо отключить, иначе он будет разгоняться в противоположном направлении вращения.

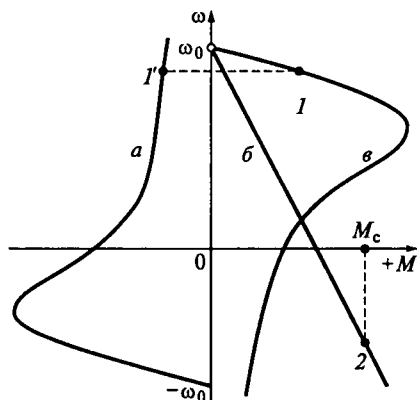


Рис. 3.20. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме противовключения:

a, в — естественные механические характеристики при включении «Вперед» и «Назад»; *б* — механическая характеристика двигателя с фазным ротором со включенным добавочным резистором в цепь ротора

Во втором случае после снятия механического тормоза двигатель, включенный в направлении вверх, под действием силы тяжести спускаемого груза будет вращаться в противоположном направлении со скоростью, соответствующей точке 2. Работа в режиме противовключения под действием протягивающего груза возможна при использовании двигателей с фазным ротором. При этом в цепь ротора вводится добавочный резистор с большим сопротивлением, чему соответствует точка 2 на рис. 3.20.

Энергетически режим противовключения крайне неблагоприятен. Ток в этом режиме для асинхронных короткозамкнутых двигателей превосходит пусковой, достигая $10I_n$. Потери в роторной цепи двигателя ΔP_s складываются из потерь короткого замыкания двигателя и мощности, которая передается на вал двигателя при торможении:

$$\Delta P_s = M_T \omega_0 + M_T \omega,$$

где M_T — тормозной момент двигателя.

Для короткозамкнутых двигателей режим противовключения возможен только в течение нескольких секунд. При использовании двигателей с фазным ротором в режиме противовключения обязательно включение в цепь ротора добавочного резистора. В этом случае потери энергии остаются такими же значительными, но они выносятся из двигателя в роторные резисторы.

3.2.8. Электромеханические характеристики многоскоростных асинхронных двигателей

Поскольку скорость электромагнитного поля статора, как это следует из (3.1), зависит от числа пар полюсов двигателя p_n , то предусмотрены специальные модификации асинхронных короткозамкнутых двигателей, позволяющие изменять число пар полюсов машины и благодаря этому получать две или более (три и четыре) рабочие скорости двигателя. Конструктивно изменение числа пар полюсов может быть достигнуто двумя способами. При первом в пазы статора укладываются две или три независимые обмотки с различными p_n . При этом значительно увеличиваются габаритные размеры двигателей, но можно получить любое соотношение числа пар полюсов.

При другом способе используется для получения различного числа пар полюсов одна и та же обмотка, а изменение p_n достигается переключением секций этой обмотки. Наибольшее распространение получили две схемы обмоток: «звезда (λ) — двойная звезда ($\lambda\lambda$)» и «треугольник (Δ) — двойная звезда ($\lambda\lambda$)».

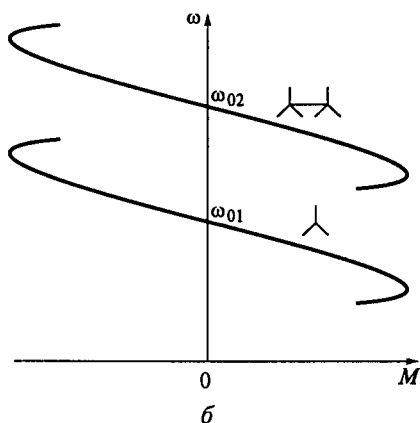
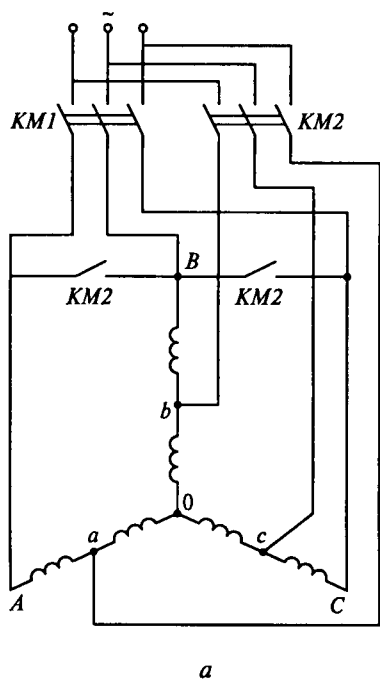


Рис. 3.21. Схема (а) и механические характеристики (б) двухскоростного асинхронного двигателя со схемой соединения обмоток «звезда — двойная звезда»

Рассмотрим схему «звезда — двойная звезда» (рис. 3.21, а). В этой схеме каждая из фазных обмоток состоит из двух секций, которые могут включаться параллельно или последовательно. При параллельном соединении напряжение подводится к средним точкам обмоток, а начала обмоток замыкаются между собой. Образуются две параллельно включенные системы обмоток, соединенные в «двойную звезду» ($\swarrow \searrow$) (рис. 3.21, б). Такое соединение соответствует меньшему числу пар полюсов p_n . Этой схеме соединения отвечает механическая характеристика, обозначенная $\swarrow \searrow$.

При последовательном соединении секций обмоток число пар полюсов увеличивается в 2 раза, поэтому номинальная скорость двигателя в этом случае будет в 2 раза меньше. Так, например, если схеме соединения «двойная звезда» соответствует $p_n = 2$, то номинальная частота вращения будет 1470 мин^{-1} ($n_0 = 1500 \text{ мин}^{-1}$). Переключив обмотки для соединения в «звезду», получим $p_n = 4$ и номинальную частоту вращения 735 мин^{-1} ($n_0 = 750 \text{ мин}^{-1}$).

Поскольку длительно допустимый ток в обмотках должен оставаться неизменным, то номинальная мощность на валу двигателя $P_{дв}$ будет следующей:

при схеме «двойная звезда» $P_{дв} = 3 U_1 \cdot 2 I_{1н} (\cos \varphi_1) \eta_n$;

при схеме «звезда» $P_{дв} = 3 U_1 \cdot I_{1н} (\cos \varphi_1) \eta_n$.

Таким образом, мощность двигателя при высокой скорости будет примерно в 2 раза выше, чем при низкой скорости. Однако

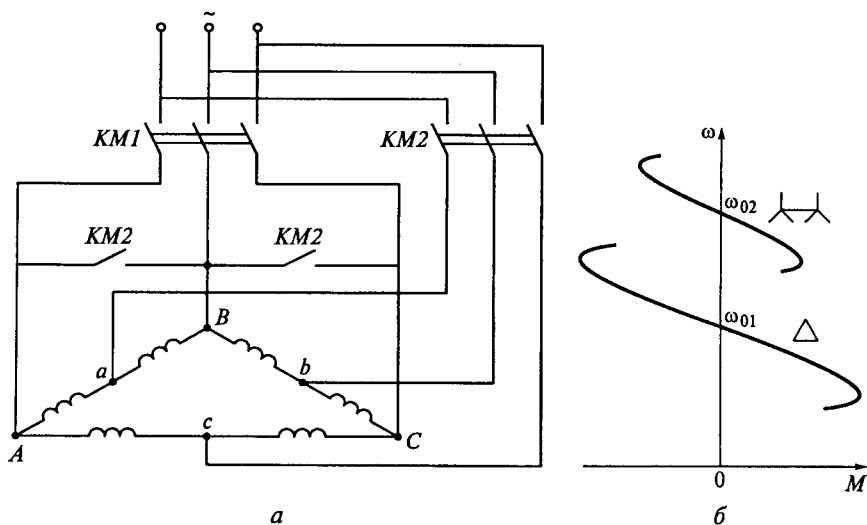


Рис. 3.22. Схема (а) и механические характеристики (б) двухскоростного асинхронного двигателя со схемой соединения обмоток «треугольник — двойная звезда»

длительно допустимый номинальный момент сохраняется постоянным, так как $M_H = P_H / \omega_H$.

Рассмотрим схему «треугольник — двойная звезда» (рис. 3.22). В этой схеме соединение обмоток двойная звезда соответствует высокой скорости.

При последовательном включении полуобмоток и соединении их в треугольник число пар полюсов увеличивается в 2 раза, следовательно, в 2 раза снижается скорость двигателя.

При этом мощность двигателя:

$$P_{дв} = 3\sqrt{3} U_1 I_{1H} (\cos \varphi_1) \eta_H,$$

где U_1 — фазное напряжение питания.

Длительно допустимый момент при соединении обмоток в треугольник будет в $\sqrt{3}$ раз больше, чем при соединении в двойную звезду. Таким образом, при обеих схемах соединения можно считать, что двигатель ориентировочно сохраняет свою мощность.

Двух- и многоскоростные двигатели применяют в тех случаях, когда по условиям технологии необходимо иметь две или более фиксированные скорости приводного электродвигателя.

3.3. Электромеханические характеристики синхронных двигателей

3.3.1. Принцип работы синхронного двигателя

Для нерегулируемых электроприводов большой мощности (свыше 160 кВт) широко применяют синхронные электродвигатели с электромагнитным возбуждением. Схема включения такого двигателя показана на рис. 3.23.

Конструкция статора синхронного двигателя аналогична конструкции статора асинхронного двигателя. Токи, протекающие по трехфазной обмотке статора, создают намагничивающие силы, результирующий вектор которых образует вращающееся в пространстве электромагнитное поле статора $\vec{\Phi}_1$. Согласно (3.1) скорость поля статора

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p_n}$$

и является рабочей скоростью синхронного двигателя.

На роторе синхронного двигателя расположена обмотка возбуждения, которая питается постоянным током от независимого регулируемого источника напряжения — возбудителя. Ток возбуж-

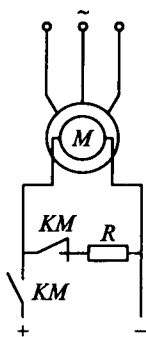


Рис. 3.23. Схема включения синхронного двигателя

дения создает электромагнитное поле $\bar{\Phi}_0$, неподвижное относительно ротора и вращающееся в установившемся режиме вместе с ротором со скоростью ω_0 . Магнитные силовые линии поля ротора «сцепляются» с вращающимся синхронно с ним электромагнитным полем статора.

Взаимодействие полей статора и ротора создает электромагнитный момент M на валу синхронной машины,

$$\bar{M} = k \bar{\Phi}_1 \times \bar{\Phi}_0, \quad (3.36)$$

где k — конструктивный коэффициент.

При отсутствии нагрузки векторы поля статора $\bar{\Phi}_1$ (рис. 3.24, а) и поля ротора $\bar{\Phi}_0$ совпадают в пространстве и совместно вращаются со скоростью ω_0 . При появлении на валу двигателя момента сопротивления M_c векторы $\bar{\Phi}_1$ и $\bar{\Phi}_0$ расходятся («растягиваются» подобно пружине) на угол θ (рис. 3.24, б), называемый углом нагрузки, причем если вектор $\bar{\Phi}_0$ отстает от вектора $\bar{\Phi}_1$, то синхронный двигатель работает в двигательном режиме и электро-

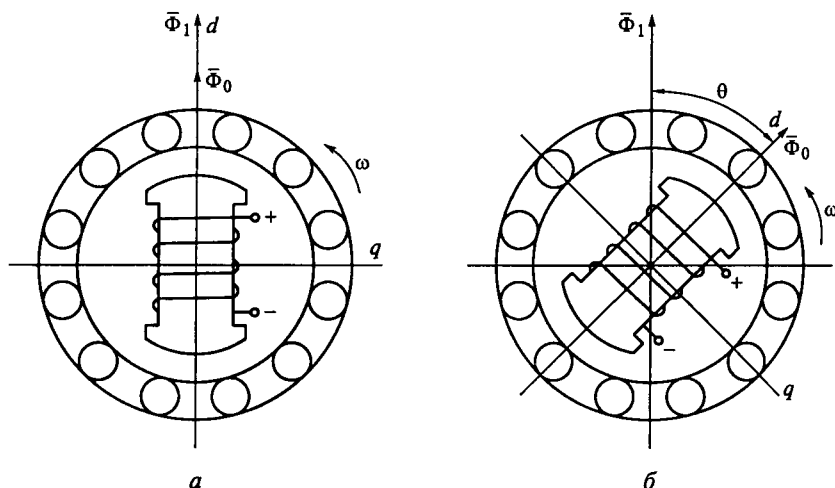


Рис. 3.24. Пространственные векторы электромагнитных полей синхронного двигателя:

а — при идеальном холостом ходе; б — при нагрузке на валу

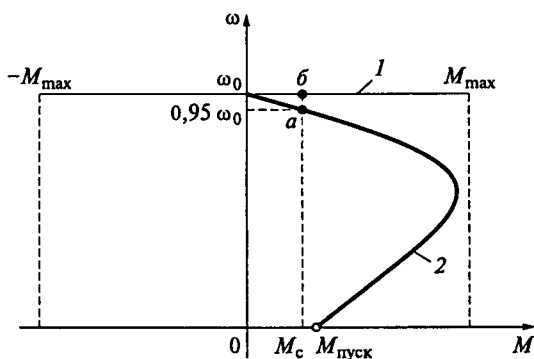


Рис. 3.25. Механические характеристики синхронного двигателя:

1 — синхронного режима; 2 — пусковая (асинхронный режим)

магнитный момент на ее валу положителен. Если синхронный двигатель работает как генератор, приводимый во вращение первичным двигателем, то вектор поля ротора опережает вектор поля статора на угол $(-\theta)$ и электромагнитный момент на валу двигателя отрицателен. Изменению нагрузки на валу двигателя соответствует изменение угла θ . Это можно сравнить с растяжением-сжатием пружины. Максимальный момент $M_{\max}$ будет при $\theta = \pi/2$. Если нагрузка на валу машины будет больше $M_{\max}$, то синхронный режим нарушается и двигатель выпадает из синхронизма.

Механическая характеристика синхронного двигателя представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс и ограниченную значениями момента $\pm M_{\max}$ (рис. 3.25). Жесткость механической характеристики $\beta = \infty$.

Поскольку ротор двигателя вращается с синхронной скоростью и скольжение отсутствует, то вся мощность электромагнитного поля статора $P_{\text{эм}}$ преобразуется в механическую мощность на валу синхронного двигателя. Если пренебречь потерями в статоре, то $P_{\text{эм}} = 3 U_1 I_1 \cos \varphi = M \omega_0$, откуда

$$M = \frac{3 U_1 I_1 \cos \varphi}{\omega_0}. \quad (3.37)$$

Рассмотрим векторную диаграмму неявнополюсного синхронного двигателя (рис. 3.26). Двигатель с неявнополюсным ротором имеет симметричную в магнитном отношении конструкцию. Пренебрегая активным сопротивлением статора, получим

$$\dot{U}_1 - \dot{E}_1 = j \dot{I}_1 x_1,$$

где $\dot{E}_1$ — ЭДС, наводимая в обмотках статора вращающимся вместе с ротором полем Φ_0 .

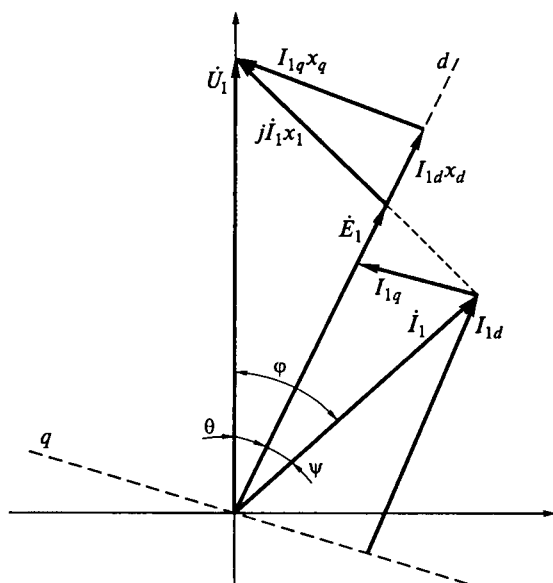


Рис. 3.26. Векторная диаграмма неявнополюсного синхронного двигателя:

q, d — оси ротора

Из векторной диаграммы следует, что

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

$$U_1 \cos \varphi = E_1 \cos(\varphi - \theta).$$

Подставив эти формулы в (3.37), получим уравнение угловой характеристики неявнополюсного синхронного двигателя

$$M = \frac{3U_1 E_1}{\omega_0 x_1} \sin \theta. \quad (3.38)$$

Из этого выражения и соответствующей ему угловой характеристики (рис. 3.27, а) следует, что по мере нагружения синхронного двигателя угол нагрузки θ увеличивается и момент достигает максимума при $\theta = \pi/2$.

ЭДС E_1 пропорциональна магнитному потоку Φ_0 , т.е. току возбуждения I_B :

$$E_1 = k_B I_B.$$

Следовательно, максимальный момент синхронного двигателя

$$M_{\max} = \frac{3U_1 I_b k_b}{\omega_0 x_1}, \quad (3.39)$$

т.е. максимальный момент синхронного двигателя (в отличие от асинхронного) зависит от напряжения питания и в определенных пределах (когда не сказывается насыщение магнитной цепи) пропорционален току возбуждения.

Исходя из соотношения (3.39), в большинстве схем автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей для сохранения постоянной перегрузочной способности двигателя предусматривается автоматическое увеличение тока возбуждения при приложении ударной нагрузки или снижении напряжения питания.

Для синхронного двигателя явнополюсной конструкции, который имеет несимметричную магнитную цепь, кроме момента, вызванного полем ротора, возникает реактивный момент вследствие того, что ротор стремится занять такое положение, при котором магнитная проницаемость для пути потока статора была бы максимальной. Момент явнополюсного синхронного двигателя содержит две составляющие: активную M' и реактивную M'' . Угловая характеристика (рис. 3.27, б) для такого двигателя описывается уравнением

$$M = \frac{3U_1 E_1}{\omega_0 x_d} \sin \theta + \frac{3U_1^2}{2\omega_0} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta,$$

где x_d и x_q — индуктивные сопротивления соответственно по продольной и поперечной осям.

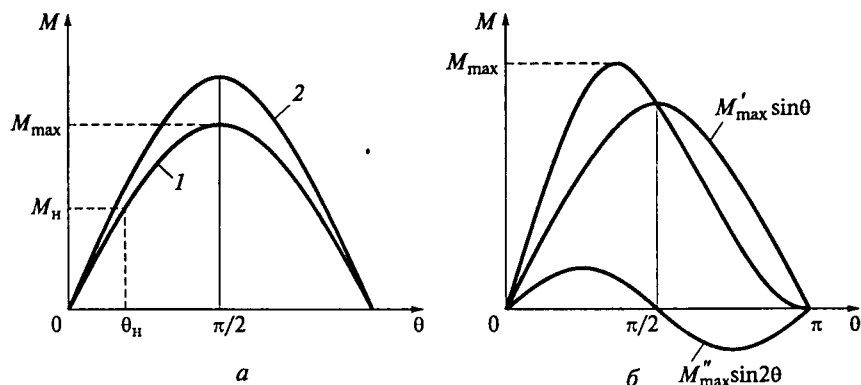


Рис. 3.27. Угловые характеристики:

а — неявнополюсного двигателя: 1 — при номинальном потоке возбуждения; 2 — при форсировании возбуждения; б — явнополюсного синхронного двигателя

3.3.2. Режимы работы синхронного двигателя

Поскольку синхронный двигатель имеет в синхронном режиме одну рабочую скорость, то пуск этих двигателей осуществляется в асинхронном режиме. Для этого в конструкции ротора предусмотрена короткозамкнутая обмотка, конструкция которой аналогична клетке ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя. В синхронных двигателях с частотой вращения 3000 мин^{-1} ротор имеет массивную конструкцию и пусковой клеткой является само тело ротора. При разгоне до подсинхронной скорости двигатель работает как асинхронный короткозамкнутый с механической характеристикой 2 (см. рис. 3.25). По достижении подсинхронной скорости (точка *a*), которая должна быть не менее $0,95\omega_0$, в обмотку возбуждения подается постоянный ток, и двигатель втягивается в синхронизм, переходя на работу в точке *б*, соответствующей синхронному режиму.

При работе в установившемся режиме с синхронной скоростью ток в пусковой клетке не протекает. Пусковая клетка ротора рассчитывается на кратковременный режим работы, и длительная (свыше 20...30 с) работа в асинхронном режиме недопустима.

Кроме обеспечения режима пуска пусковая клетка играет роль демпферной обмотки, стабилизируя переходные процессы при работе двигателя в синхронном режиме.

Синхронные двигатели промышленного назначения имеют электромагнитное возбуждение от независимого источника постоянного тока, в качестве которого используются: генераторы постоянного тока *GE* (возбудители), которые могут располагаться на одном валу с синхронным двигателем (рис. 3.28, *б*) или приводиться во вращение отдельным двигателем *M_т* (рис. 3.28, *а*), тиристорные управляемые выпрямители *UZ*, которые могут получать питание от промышленной сети (рис. 3.28, *в*) либо от специального генератора переменного тока *GE*, располагаемого на одном валу с синхронным двигателем. В последнем случае (рис. 3.28, *г*) полупроводниковые выпрямители *UZ* и *VS* находятся на роторе синхронной машины (система с вращающимися выпрямителями), вследствие чего не требуются щетки и кольца для подвода тока к обмотке возбуждения, т.е. синхронная машина становится бесконтактной.

Во время разгона, когда двигатель работает в асинхронном режиме, возбудитель может быть подключен к обмотке ротора при снятом напряжении возбудителя (схема с глухоподключенным возбудителем), а может быть отключен от обмотки возбуждения контактором *KM* (см., например, схемы на рис. 3.23 и 3.28, *а*). В последнем случае обмотка возбуждения замыкается на резистор *R* или накоротко. Оставлять концы обмотки возбуждения во время разгона разомкнутыми нельзя, так как в обмотке при больших скольжениях наводится значительная ЭДС скольжения.

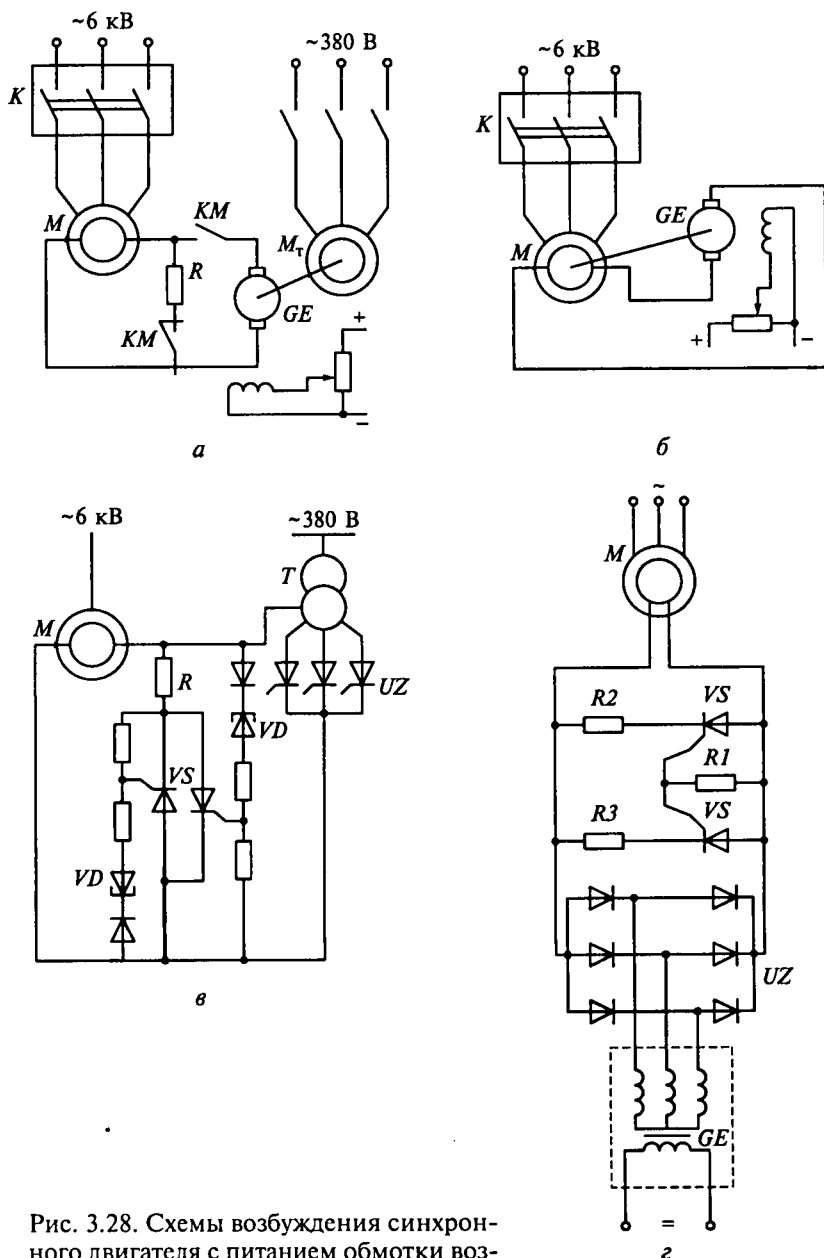


Рис. 3.28. Схемы возбуждения синхронного двигателя с питанием обмотки возбуждения:

a — от отдельного мотор-генератора; *б* — от генератора, расположенного на валу синхронного двигателя; *в* — от тиристорного возбудителя; *г* — от встроенного генератора

При использовании в качестве возбудителя тиристорного преобразователя или вращающихся выпрямителей во время пуска обмотка возбуждения закорачивается через шунтирующие тиристоры VS .

Рассмотрим схему на рис. 3.28, в. При пуске двигателя в асинхронном режиме напряжение тиристорного преобразователя UZ равно нулю. В обмотке возбуждения индуцируется переменная ЭДС скольжения, под действием которой через стабилитроны VD открываются вспомогательные тиристоры VS , и обмотка возбуждения закорачивается на разрядный резистор R . Когда двигатель достигает подсинхронной скорости, ЭДС скольжения становится малой, стабилитроны запираются и тиристоры VS отключают разрядный резистор, после чего в обмотку возбуждения подается постоянный ток от преобразователя UZ .

В последние годы получили распространение возбудители, встроенные в конструкцию синхронной машины (см. рис. 3.28, г). Возбудитель состоит из синхронного генератора GE , ротор которого расположен на валу синхронного двигателя M , неуправляемого выпрямителя, вспомогательных тириستоров VS и разрядных резисторов $R2$ и $R3$, также размещенных на валу синхронного двигателя. Регулирование тока возбуждения производится изменением тока возбуждения генератора GE . По достижении подсинхронной скорости цепи, шунтирующие обмотку возбуждения, замыкаются и в обмотку подается постоянный ток, после чего двигатель втягивается в синхронизм, его скорость достигает синхронной, и в дальнейшем он работает в синхронном режиме.

3.3.3. Регулирование тока возбуждения синхронного двигателя

Регулирование тока возбуждения двигателя при работе в синхронном режиме осуществляет, как правило, система автоматического регулирования (САР) возбуждения, которая выполняет две основные функции. Первая функция — обеспечение устойчивой работы в синхронном режиме. При набросах нагрузки или при снижении напряжения питания САР возбуждения увеличивает ток возбуждения, благодаря чему увеличивается максимальный момент двигателя в синхронном режиме (см. рис. 3.27). Вторая функция — автоматическое регулирование реактивной мощности, циркулирующей в статорной цепи двигателя.

Важным достоинством синхронных двигателей является возможность регулирования величины реактивной мощности, циркулирующей в цепи статора. Кроме того, потребляя активную мощность, синхронный двигатель одновременно генерирует реактивную мощность, т. е. является компенсатором реактивной мощ-

ности, потребляемой другими параллельно работающими приемниками электрической энергии, прежде всего асинхронными двигателями.

Применение на предприятиях наряду с асинхронными двигателями синхронных двигателей позволяет уменьшить реактивную мощность, потребляемую предприятием в целом, и поддерживать нормативное значение $\cos \varphi$ в энергосистеме данного предприятия.

Возможность регулирования реактивной мощности в цепи статора двигателя путем изменения тока его возбуждения иллюстрируется векторными диаграммами на рис. 3.29.

Векторная диаграмма (рис. 3.29, а) соответствует току возбуждения, который меньше номинального; при этом вектор тока статора $\dot{I}_1$ отстает от вектора напряжения сети $\dot{U}_1$ на угол φ , т.е. двигатель работает с отстающими $\cos \varphi$ (реактивная мощность «потребляется»). При увеличении тока возбуждения ЭДС E_1 , наводимая в обмотках статора, увеличивается и может достигнуть такого значения, при котором ток статора $\dot{I}_1$ будет совпадать по фазе с напряжением $\dot{U}_1$, т.е. $\cos \varphi = 1$ (рис. 3.29, б). Момент на валу двигателя при этом будет такой же, как и в предыдущем случае, но реактивная мощность будет равна нулю. Как следует из формулы (3.37), ток статора I_1 при данном моменте нагрузки будет минимальным. Этот режим является энергетически наиболее выгодным для синхронного двигателя, так как потери в статоре будут минимальны.

Если еще больше увеличить ток возбуждения, то ток статора будет опережать по фазе напряжение $\dot{U}_1$, $\cos \varphi$ станет опережаю-

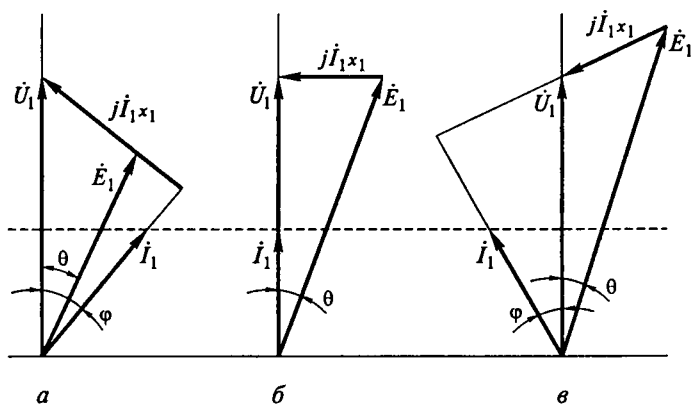


Рис. 3.29. Векторные диаграммы синхронного двигателя при разных токах возбуждения и одинаковой нагрузке на валу:

а — отстающий $\cos \varphi$; б — $\cos \varphi = 1$; в — опережающий $\cos \varphi$

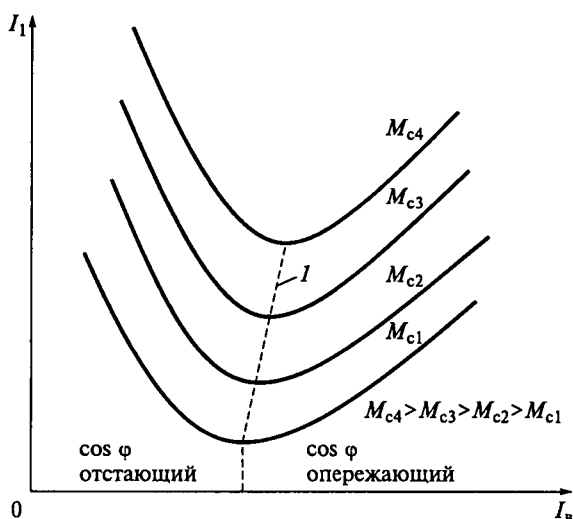


Рис. 3.30. U -образные характеристики синхронного двигателя:
 $I - \cos \varphi = 1$

шим и синхронный двигатель будет генерировать реактивную мощность (рис. 3.29, *в*). Зависимости тока статора I_1 от тока возбуждения I_B синхронного двигателя представляют собой U -образные характеристики синхронного двигателя (рис. 3.30).

Пример 3.2. Два двигателя (рис. 3.31) — асинхронный $M1$ с короткозамкнутым ротором и синхронный $M2$ получают от шин питания напряжением 6 кВ. Двигатель $M1$ работает с постоянной номинальной нагрузкой на валу. Двигатель $M2$ работает с постоянной нагрузкой на валу, составляющей 50 % от номинальной. Режим работы двигателей — продолжительный.

Задача — определить, какой ток следует установить в обмотке возбуждения синхронного двигателя, чтобы на шинах, питающих двигатели, $\cos \varphi = 1$.

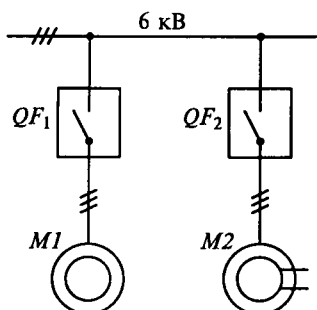


Рис. 3.31. Электрическая схема включения двигателей

Технические данные двигателей:

1) синхронный двигатель: тип СД2; линейное напряжение статора $U_{1л} = 6000$ В; мощность $P_n = 800$ кВт; номинальный ток статора $I_{1н} = 90$ А; частота вращения 1000 мин⁻¹; номинальный ток возбуждения $I_{в.н} = 175$ А; номинальный КПД $\eta_n = 95$; номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0,9$ (опережающий);

2) асинхронный двигатель: тип АН2-15-57-10; напряжение $U_{1л} = 6000$ В; номинальный ток статора $I_{1н} = 80$ А; номинальная частота вращения 592 мин⁻¹, $\cos \varphi = 0,8$.

Решение. Реактивная мощность, циркулирующая в цепи статора асинхронного двигателя (АД),

$$Q_{АД} = \sqrt{3} U_{1л} I_{1н} \sin \varphi_n = \sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 80 \cdot 0,6 = 500 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}.$$

Для компенсации этой реактивной мощности синхронный двигатель должен работать с опережающим $\cos \varphi$ и реактивным током

$$I_p = \frac{Q_{АД}}{\sqrt{3} U_{1л}} = \frac{500\,000}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 48,2 \text{ А}.$$

Активная составляющая тока статора при нагрузке на валу, равной $0,5$ номинальной:

$$I_a = \frac{0,5 P_n}{\sqrt{3} U_{1л} \eta_n} = \frac{0,5 \cdot 800\,000}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,95} = 40,6 \text{ А}.$$

Полный ток статора синхронного двигателя в этом режиме

$$I_1 = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{40,6^2 + 48,2^2} = 63 \text{ А}.$$

Коэффициент мощности синхронного двигателя (СД) в этом режиме

$$\cos \varphi_{сд} = \frac{I_a}{I_1} = \frac{40,6}{63} = 0,644 \text{ (опережающий)}.$$

Для того чтобы определить ток возбуждения синхронного двигателя в рассматриваемом режиме, воспользуемся упрощенным уравнением угловой характеристики синхронного двигателя (3.38).

Сначала определим из условий номинального режима параметры синхронного двигателя: x_1 и $E_{1н}$.

Номинальный момент

$$M_n = \frac{3 U_1 E_1}{\omega_0 x_1} \sin \theta_n.$$

Так как перегрузочная способность данного двигателя $M_{\max}/M_n = 2$, то $\sin \theta_n = 0,5$, т.е. $\theta_n = 30^\circ$.

Из векторной диаграммы на рис. 3.26 имеем

$$U_{1\phi} \sin \theta = I_1 x_1 \cos(\varphi - \theta), \quad (3.40)$$

где $U_{1\phi}$ — фазное напряжение статора.

Для номинального режима

$$x_1 = \frac{U_{1\phi} \sin \theta_n}{I_{1n} \cos(\varphi_n - \theta_n)} = \frac{3470 \cdot 0,5}{90 \cos(-\arccos 0,9 - 30^\circ)} = 34,4 \text{ Ом};$$

$$E_{1n} = \frac{M_n \omega_0 x_1}{3 U_{1\phi} \sin \theta_n} = \frac{P_n x_1}{3 U_{1\phi} \sin \theta_n} = \frac{800\,000 \cdot 34,4}{3 \cdot 3470 \cdot 0,5} = 5290 \text{ В}.$$

Из (3.40) получим

$$U_{1\phi} \sin \theta = I_1 x_1 (\cos \varphi \cdot \cos \theta + \sin \varphi \cdot \sin \theta);$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{I_1 x_1 \cos \varphi}{U_{1n} - I_1 x_1 \sin \varphi}.$$

Для заданного режима

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{63 \cdot 34,4 \cdot 0,644}{3470 - 63 \cdot 34,4(-0,77)} = 0,27;$$

$$\sin \theta = 0,277.$$

Из уравнения угловой характеристики (3.38) найдем E_1 , соответствующую заданному режиму:

$$E_1 = \frac{M \omega_0 x_1}{3 U_{1\phi} \sin \theta} = \frac{3824 \cdot 104,6 \cdot 34,4}{3 \cdot 3470 \cdot 0,277} = 4770 \text{ В},$$

где $M = 0,5 M_n = 0,5 \frac{P_n}{\omega_0} = 0,5 \frac{800\,000}{104,6} = 3824 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

Полагая, что ЭДС E_1 пропорциональна току возбуждения, найдем, что заданному режиму будет соответствовать ток возбуждения

$$I_{\text{в}} = I_{\text{в.н}} \frac{E_1}{E_{1n}} = 175 \frac{4770}{5290} = 157,8 \text{ А}.$$

3.4. Однофазные асинхронные двигатели

Для приводов бытовых и других рабочих машин мощностью примерно до 5 кВт часто используют однофазные асинхронные двигатели. Применение таких двигателей необходимо, когда ис-

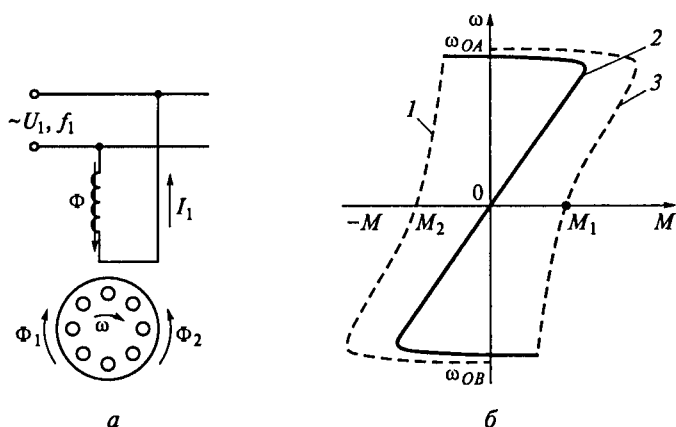


Рис. 3.32. Электрическая схема (а) и механические характеристики (б) однофазного асинхронного двигателя:

1 — характеристика, созданная магнитным полем прямой последовательности; 2 — характеристика, созданная магнитным полем обратной последовательности; 3 — результирующая характеристика

точником электроэнергии является однофазная сеть переменного тока.

Однофазные асинхронные двигатели имеют на статоре две обмотки: рабочую и пусковую. Ротор двигателя выполняется короткозамкнутым в виде беличьей клетки. Рабочая обмотка двигателя (рис. 3.32, а) подключается к однофазной сети переменного тока (обычно фаза — нуль). Однофазный ток, протекающий по этой обмотке, создает не вращающееся, как в трехфазных двигателях, а пульсирующее магнитное поле. Пульсирующее поле можно разложить на два поля, имеющих равные амплитуды, но вращающихся в противоположные стороны с одинаковой скоростью $\omega_{OA} = \omega_{OB}$.

Этим вращающимся магнитным полям соответствуют механические характеристики 1 и 2 на рис. 3.32, б. Результирующая механическая характеристика двигателя 3 получается сложением моментов по характеристикам 1 и 2 при одной и той же скорости. Особенность характеристики двигателя состоит в том, что пусковой момент (при $\omega = 0$) равен нулю, вследствие чего пуск двигателя невозможен.

Поэтому для пуска однофазных асинхронных двигателей используется дополнительная пусковая обмотка. Эта обмотка расположена в пазах статора двигателя со смещением на 90° . Как правило, по окончании пуска пусковая обмотка отключается. Наилучшие пусковые характеристики у схемы с пусковой обмоткой, подключенной через конденсатор.

Контрольные вопросы

1. Что нужно сделать, чтобы изменить направление вращения асинхронного двигателя?
2. Номинальная частота вращения асинхронного двигателя 735 мин^{-1} . Каково число пар полюсов этого двигателя?
3. В паспорте асинхронного двигателя с фазным ротором указано, что номинальная ЭДС ротора равна 240 В. При какой скорости двигателя напряжение на кольцах ротора будет равно 240 В?
4. Какова зависимость максимального момента асинхронного двигателя от напряжения питания?
5. Что нужно сделать, чтобы изменить критическое скольжение асинхронного двигателя?
6. При каких скольжениях асинхронный двигатель работает в режиме рекуперативного торможения, торможения противовключением?
7. От чего зависит индуктивное сопротивление обмотки ротора асинхронного двигателя?
8. Почему у асинхронного короткозамкнутого двигателя пусковой ток составляет 5,5...6 номинального, а пусковой момент близок к номинальному?
9. Как реализуется способ динамического торможения асинхронного двигателя?
10. Поясните принцип изменения числа пар полюсов многоскоростного асинхронного двигателя.
11. Чему равны потери в роторе асинхронного двигателя, если он путем снижения напряжения питания работает со скоростью, равной 70 % от синхронной, при номинальном моменте на его валу?
12. С какой целью в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором при пуске включают добавочные резисторы?
13. Что показывает угловая характеристика синхронного двигателя?
14. Каково назначение короткозамкнутой обмотки (беличьей клетки) на роторе синхронного двигателя?
15. Какие источники тока используют для возбуждения синхронного двигателя?
16. С какой целью регулируют ток возбуждения синхронного двигателя?
17. Что нужно сделать, чтобы коэффициент мощности в цепи статора синхронного двигателя стал опережающим?
18. Если синхронный двигатель работал в режиме, при котором $\cos \varphi_1 = 1$, как изменится ток статора, если при той же нагрузке на валу увеличить ток возбуждения?
19. Если асинхронный двигатель имеет номинальную частоту вращения 980 мин^{-1} , какова частота тока ротора при работе его в номинальном режиме?

4.1. Регулируемый электропривод — основной вид автоматизированного электропривода

Регулируемый электропривод в составе технологических машин и агрегатов обычно применяют в следующих случаях:

- если необходимо оперативное управление ходом технологического процесса (электроприводы грузоподъемных кранов, экскаваторов, реверсивных прокатных станов и других машин);
- когда необходимо устанавливать и точно выдерживать технологический режим (электроприводы станов непрерывной прокатки, бумагоделательных машин, отделочных агрегатов текстильной промышленности и др.);
- если необходима корректировка технологического процесса (электроприводы питателей, дозаторов и др.);
- при автоматическом управлении режимом обработки материала (электроприводы станков с ЧПУ и др.);
- когда необходимо оптимизировать технологический процесс по затратам электроэнергии (электроприводы насосов, вентиляторов, компрессоров).

Приведенный перечень случаев может быть расширен и дополнен.

По мере развития рабочих машин и механизмов, применения высоких технологий потребность в регулируемых электроприводах существенно возросла, и автоматизированный регулируемый электропривод составляет энергетическую и кибернетическую (с точки зрения управления) основы большинства рабочих машин и агрегатов во всех технологических областях.

Автоматизированный электропривод выполняет две технологические функции:

- 1) преобразование электрической энергии в механическую, необходимую для осуществления данного технологического процесса;
- 2) управление технологическим процессом, причем с определенной степенью оптимизации этого процесса по ряду критериев, обеспечению максимальной производительности, точности и качеству обработки, минимальному расходу энергии и т. п. Конкретные задачи управления многообразны и определяются характером технологического процесса.

Вторая функция автоматизированного электропривода всецело связана с необходимостью регулирования величин, характеризующих движение электропривода (скорости, момента, координат рабочего органа). Выполнение этой функции возможно только посредством использования регулируемого электропривода. Использование для целей регулирования механических или гидравлических средств (вариаторы, коробки передач, гидромуфты и др.) сегодня является технически и экономически неоправданным.

Под регулируемым электроприводом понимают электропривод, обеспечивающий регулирование скорости (или момента) в заданном диапазоне с необходимой точностью. В большинстве случаев система управления регулируемого электропривода должна обеспечивать также заданный характер переходных процессов при изменении скорости, момента или других координат электропривода.

Поскольку по своим электромеханическим свойствам электродвигатели в естественной схеме включения в питающую сеть не могут обеспечить регулирование переменных, характеризующих движение электропривода с нужным качеством, для создания регулируемого электропривода приходится преобразовывать электрическую энергию, подводимую к двигателю или отводимую от него. Преобразование электрической энергии осуществляется посредством полупроводниковых преобразователей.

Регулируя переменные преобразованной электрической энергии (частоту, напряжение, форму и длительность импульсов и др.) удается получить требуемые для регулируемого привода механические и динамические характеристики. Для управления выходными регулируемыми величинами (напряжение, частота и др.) полупроводниковых преобразователей, входящих в состав регулируемого электропривода, служат внутренние контуры автоматического регулирования — это регуляторы тока, ЭДС, тока возбуждения и др. Поэтому регулируемый электропривод всегда является автоматизированным, так как содержит средства автоматического управления, формирующие характеристики электропривода.

Внешние контуры регулирования определяют переменные, характеризующие движение электропривода: скорость или положение рабочего органа. Обычно эти контуры регулирования являются замкнутыми, т.е. содержат отрицательную обратную связь по регулируемой величине и соответствующий регулятор. Типичная схема замкнутого контура регулирования скорости представлена на рис. 4.1.

Задание на скорость u_{zc} может формироваться вручную, например, машинистом экскаватора, крановщиком, оператором, или автоматически от системы числового программного управления

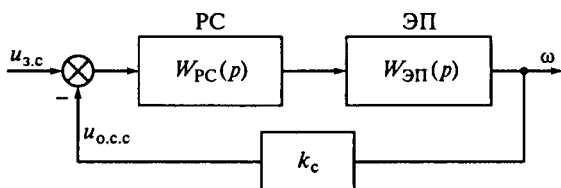


Рис. 4.1. Структурная схема контура регулирования скорости:

$u_{з.с}$ — задание скорости; $u_{о.с.с}$ — сигнал обратной связи по скорости; РС — регулятор скорости с передаточной функцией $W_{РС}(p)$; k_c — коэффициент обратной связи по скорости; $W_{ЭП}(p)$ — передаточная функция электропривода с внутренним контуром регулирования

(ЧПУ), например в приводе станков, от технологических регуляторов или управляющих устройств верхнего уровня автоматизации.

Передаточную функцию регулятора скорости (РС) $W_{РС}(p)$ выбирают такой, чтобы обеспечить требуемое качество регулирования по статическим (диапазон, точность) и динамическим показателям (быстродействие, перерегулирование, колебательность).

Двигатели, полупроводниковые преобразователи электрической энергии, датчики и устройства автоматического регулирования в совокупности образуют систему регулируемого электропривода. Эти системы различаются прежде всего по виду приводного электродвигателя, а также по виду используемых полупроводниковых преобразователей электрической энергии, питающих двигатель.

Регулирование скорости — это изменение скорости посредством системы управления исходя из требований технологического процесса. Такое регулирование проводится при подаче на вход системы регулирования управляющего воздействия $u_{з.с}$. Однако регулирование скорости может выполняться и при неизменном управляющем воздействии, когда задача регулирования заключается в стабилизации скорости при появлении возмущающих воздействий, например при изменении нагрузки, прикладываемой к валу электродвигателя.

4.2. Показатели качества регулирования скорости

Одним из основных показателей, характеризующих регулирование скорости электропривода, является диапазон регулирования. Диапазон регулирования D — это отношение максимальной установившейся скорости электропривода к минимальной с учетом изменении нагрузки на валу двигателя в заданных пределах. Определение диапазона регулирования показано на рис. 4.2.

Положим, что электропривод имеет прямолинейные механические характеристики. Прямая 1 соответствует максимальной по скорости механической характеристике.

Положим, что регулировочные характеристики привода будут перемещаться вниз параллельно прямой 1, имея ту же жесткость β , которая характерна для большинства современных систем регулируемого электропривода. Нижней предельной характеристикой, которая будет обеспечивать требуемый максимальный момент, является прямая 2. Диапазон регулирования будет равен отношению максимальной скорости к минимальной, которые определяются по среднему моменту из заданных минимального и максимального его значений [8].

Средний момент

$$M_{\text{ср}} = \frac{M_{\text{max}} + M_{\text{min}}}{2}.$$

Диапазон регулирования

$$D = \frac{\omega_{\text{max}}}{\omega_{\text{min}}} = \frac{\omega_a}{\omega_b}, \quad (4.1)$$

где ω_a , ω_b — скорость соответственно в точках a , b .

Из графиков на рис. 4.2 находим:

$$\omega_{\text{max}} = \omega_0 - \frac{M_{\text{max}} + M_{\text{min}}}{2\beta}; \quad \omega_{\text{min}} = \frac{M_{\text{max}} - M_{\text{min}}}{2\beta},$$

где β — жесткость.

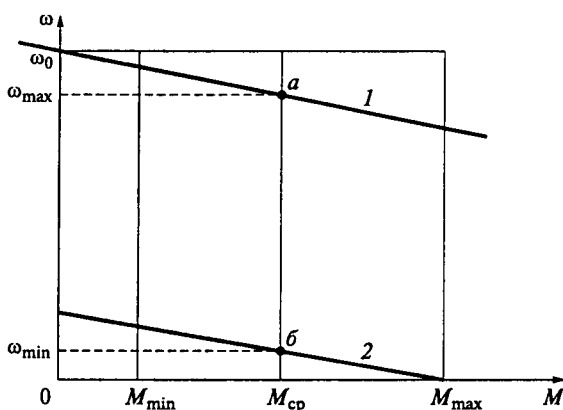


Рис. 4.2. К определению диапазона регулирования по скорости:

1, 2 — механические характеристики, соответствующие максимальной и минимальной скорости

Подставив эти величины в (4.1), получим

$$D = \frac{2\beta\omega_0 - M_{\max} - M_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}}. \quad (4.2)$$

Из формулы (4.2) следует, что диапазон регулирования зависит от жесткости механических характеристик привода: чем больше жесткость, тем больше диапазон регулирования.

Вторым важным показателем качества регулирования является точность регулирования скорости. Статическая ошибка $\Delta\omega_c$ характеризует реакцию электропривода на приложение (снятие) нагрузки. Если мы анализируем регулируемый электропривод, имеющий линейные (линеаризованные) механические характеристики, которые в зависимости от управляющего воздействия могут плавно перемещаться вниз от основной с постоянной жесткостью β (рис. 4.3), то абсолютная статическая ошибка

$$\Delta\omega_c = \frac{M_c}{\beta}. \quad (4.3)$$

Эта ошибка при постоянной жесткости механических характеристик будет одной и той же во всем диапазоне регулирования.

Относительная статическая ошибка — это отношение абсолютной статической ошибки к базовой (заданной) скорости $\omega_{\text{зад}}$:

$$\Delta_c = \frac{\Delta\omega_c}{\omega_{\text{зад}}}. \quad (4.4)$$

Из (4.3) и (4.4) следует, что статическая ошибка, связанная с возмущением по нагрузке, обратно пропорциональна жесткости механических характеристик.

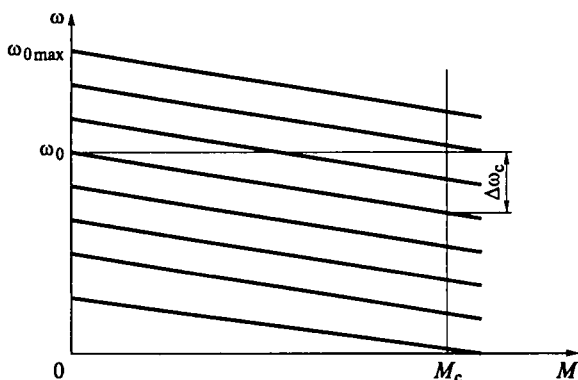


Рис. 4.3. Линейные механические характеристики электропривода

Минимальная скорость $\omega_{\min}$ заданного диапазона регулирования скорости может ограничиваться также требуемой точностью регулирования (статизмом). В соответствии с (4.4) точность поддержания заданной скорости как величина относительная будет тем меньше, чем меньше заданная минимальная скорость. Поэтому условие выполнения заданной точности будет следующим:

$$\Delta_c = \frac{\Delta\omega}{\omega_{\min}} \leq \Delta_{\text{доп}},$$

где $\Delta_{\text{доп}}$ — допустимая ошибка.

Учитывая, что

$$\Delta\omega = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2\beta},$$

получим

$$\omega_{\min} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2\beta\Delta_{\text{доп}}}.$$

Тогда из условия обеспечения заданной точности диапазон регулирования скорости

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = \frac{\Delta_{\text{доп}} (2\beta\omega_0 - M_{\max} - M_{\min})}{M_{\max} - M_{\min}}. \quad (4.5)$$

Обычно жесткость механических характеристик электропривода с разомкнутой системой управления недостаточна для достижения требуемых диапазона регулирования и статической точности. Потому в регулируемых электроприводах, как правило, используют замкнутые по скорости системы регулирования.

Рассмотрим влияние отрицательной обратной связи по скорости на механические характеристики электропривода.

На рис. 4.4 представлена структурная схема электропривода с разомкнутой системой управления (рис. 4.4, а) и с системой управления, включающей в себя отрицательную жесткую обратную связь по скорости, т. е. с замкнутой по скорости системой управления (рис. 4.4, б). При разомкнутой системе управления заданная скорость (см. рис. 4.4, а)

$$\omega_{\text{зад}} = k_y x_{\text{зад}},$$

где k_y — коэффициент усиления регулятора; $x_{\text{зад}}$ — сигнал задания скорости.

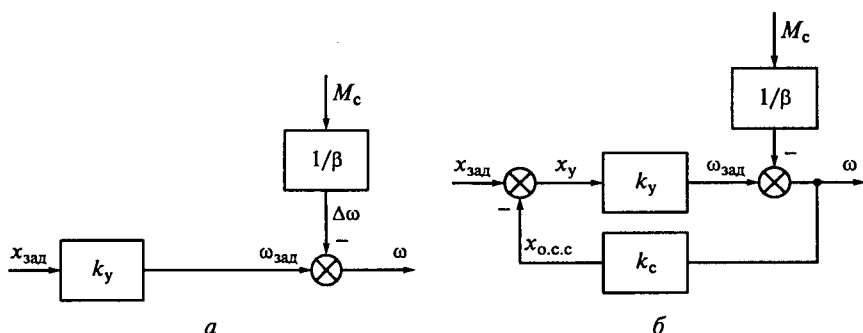


Рис. 4.4. Структурные схемы электропривода с линейными механическими характеристиками:

а — разомкнутая; *б* — замкнутая по скорости

Статическая ошибка, возникающая при приложении момента сопротивления M_c , будет зависеть от жесткости механических характеристик ((см. (4.3)). Разомкнутая система управления не может автоматически компенсировать или уменьшить ошибку по возмущению.

В замкнутой системе управления с жесткой отрицательной обратной связью по контролируемому параметру (в рассматриваемом случае по скорости) этот параметр через датчик скорости с передаточным коэффициентом k_c подается с отрицательным знаком на вход системы регулирования.

Сигнал обратной связи по скорости

$$x_{\text{о.с.с}} = k_c \omega \quad (4.6)$$

Таким образом, регулирование скорости осуществляется по ошибке, т. е. разности между заданным и действующим значениями скорости:

$$x_y = x_{\text{зад}} - x_{\text{о.с.с}} \quad (4.7)$$

Рассмотрим механизм действия отрицательной обратной связи (рис. 4.5). Пусть характеристики I — механические характеристики электропривода с разомкнутой системой управления. Если задано значение скорости $\omega_{0 \text{ зад}}$, то при $M_c = 0$ привод будет работать с заданной скоростью. При приложении нагрузки M_c и разомкнутой системе регулирования скорость двигателя снизится на величину $\Delta\omega$, пропорциональную отрезку av . При этом двигатель работает на механической характеристике, определяемой прямой $\omega_{0 \text{ зад}} - v$, имеющей жесткость β , и ошибка по скорости

$$\Delta\omega_c = M_c / \beta.$$

В замкнутой системе регулирования процесс изменения скорости протекает иначе. После приложения нагрузки скорость начнет снижаться. При этом будет уменьшаться сигнал обратной связи по скорости $k_c \omega$, в результате чего разность $(x_{\text{зад}} - x_{\text{о.с.с}})$ увеличится, а следовательно, увеличится сигнал задания скорости $\omega_{\text{зад}}$:

$$\omega_{\text{зад}} = k_y (x_{\text{зад}} - x_{\text{о.с.с}}). \quad (4.8)$$

Увеличение сигнала задания скорости холостого хода произойдет до величины $\omega_{0б}$, и двигатель автоматически перейдет на механическую характеристику $\omega_{0б} - б$ и после завершения переходного процесса будет работать в точке $б$. В результате установившаяся статическая ошибка по скорости в замкнутой системе составит $\Delta\omega_{\text{замк}}$, определяемую отрезком $аб$, существенно меньшим, чем это было бы в разомкнутой системе:

$$\frac{\Delta\omega_{\text{с.замк}}}{\Delta\omega} = \frac{аб}{ав}. \quad (4.9)$$

Если статический момент равен $M_{сз}$, то электропривод будет работать в точке $з$, если $M_c = M_{се}$, то привод будет работать в точке $е$.

Мы видим, что механическая характеристика замкнутой системы представляет собой совокупность точек $\omega_{0\text{зад}} - з - б - д - е$, принадлежащих механическим характеристикам разомкнутой си-

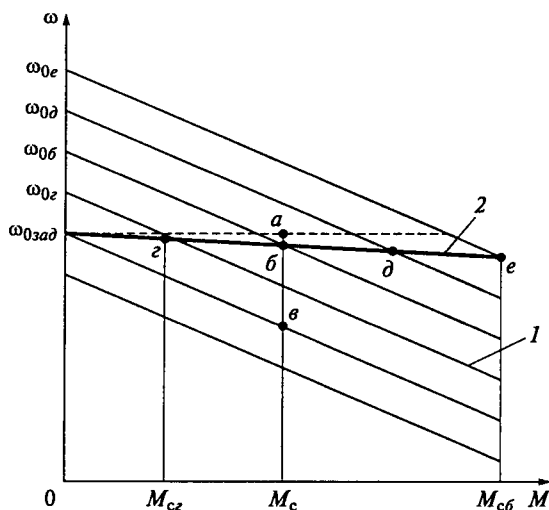


Рис. 4.5. Механические характеристики электропривода с системами управления:

1 — разомкнутой; 2 — замкнутой

стемы с различными значениями скорости холостого хода. Жесткость $\beta_{\text{замк}}$ механической характеристики замкнутой системы (прямая 2) будет выше жесткости характеристик разомкнутой системы.

Механическая характеристика замкнутой системы описывается уравнением

$$\omega = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta_{\text{замк}}},$$

где $\omega_{0\text{зад}}$ считают равной $\omega_{\text{зад}}$ и определяют из (4.8).

Тогда

$$\omega = k_y (x_{\text{зад}} - x_{\text{о.с.с}}) - \frac{M_c}{\beta};$$

$$\omega = k_y x_{\text{зад}} - k_y k_c \omega - \frac{M_c}{\beta},$$

откуда
$$\omega = \frac{k_y x_{\text{зад}}}{1 + k_y k_c} - \frac{M_c}{\beta(1 + k_y k_c)}.$$

Обозначив $k_y k_c = K$ — коэффициент усиления разомкнутой системы (при разрыве обратной связи по скорости), получим

$$\omega = \frac{k_y x_{\text{зад}}}{1 + K} - \frac{M_c}{\beta(1 + K)},$$

или

$$\omega = k_y x_{\text{зад.замк}} - \frac{M_c}{\beta_{\text{замк}}},$$

где $x_{\text{зад.замк}}$ — сигнал задания скорости в замкнутой системе;

$$\beta_{\text{замк}} = \beta(1 + K). \quad (4.10)$$

Мы видим, что жесткость механических характеристик в замкнутой системе увеличивается по сравнению с жесткостью механических характеристик разомкнутой системы в $(1 + K)$ раз.

Следовательно, статическая ошибка уменьшается в $(1 + K)$ раз:

$$\Delta\omega_{\text{с.замк}} = \frac{\Delta\omega_{\text{с}}}{1 + K}. \quad (4.11)$$

Сопоставив (4.11) с (4.9), получим (см. рис. 4.5)

$$\frac{ab}{av} = \frac{1}{1 + K}.$$

Таким образом, введение отрицательной обратной связи по скорости повышает жесткость механических характеристик привода, уменьшает статическую ошибку, расширяет диапазон регулирования скорости. Введение обратной связи по скорости также сказывается на динамических характеристиках привода — повышается быстродействие привода. Показатели качества регулирования, характеризующие динамические свойства привода, рассмотрены в гл. 8.

Пример 4.1. Электропривод имеет линейные механические характеристики с жесткостью $\beta = 10 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$. Номинальный момент $M_n = 50 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Наибольшая скорость холостого хода $\omega_0 = 104,6 \text{ с}^{-1}$. Следует найти диапазон регулирования скорости, который обеспечивает данный электропривод, если момент сопротивления на валу двигателя может изменяться в пределах $0,15 M_n \leq M_c \leq 1,2 M_n$ и требуемая точность поддержания заданной скорости составляет 10 %, т.е. $\Delta_{\text{доп}} = 0,1$.

Задача — определить, какой должна быть жесткость механических характеристик, чтобы достичь диапазона регулирования $D = 100$.

Решение. Диапазон регулирования определим по формуле (4.5):

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = \frac{\Delta_{\text{доп}} (2\beta\omega_0 - M_{\max} - M_{\min})}{M_{\max} - M_{\min}} = \frac{0,1(2 \cdot 10 \cdot 104,6 - 1,2 \cdot 50 - 0,15 \cdot 50)}{1,2 \cdot 50 - 0,15 \cdot 50} = 3,86.$$

Для того чтобы достичь диапазона регулирования $D = 100$, жесткость механических характеристик нужно повысить до

$$\beta = \frac{D(M_{\max} - M_{\min}) + \Delta_{\text{доп}}(M_{\max} + M_{\min})}{2\omega_0\Delta_{\text{доп}}} = \frac{100(1,2 \cdot 50 - 0,15 \cdot 50) + 0,1(1,2 \cdot 50 + 0,15 \cdot 50)}{2 \cdot 104,6 \cdot 0,1} = 250.$$

Увеличения жесткости механических характеристик можно добиться, применив замкнутую по скорости систему регулирования и повысив общий коэффициент усиления разомкнутой системы.

Контрольные вопросы

1. Назовите технические требования, которые определяют необходимость применения регулируемого электропривода.
2. Что такое диапазон регулирования по скорости?
3. От какого параметра зависит диапазон регулирования скорости электропривода?
4. В чем различие между абсолютной и относительной статическими ошибками?

5. Какая обратная связь применяется для повышения жесткости механических характеристик электропривода?
6. Во сколько раз жесткость механических характеристик электропривода с замкнутой системой управления выше жесткости механических характеристик привода с разомкнутой системой управления?
7. Во сколько раз уменьшается статическая ошибка при использовании замкнутой по скорости системы управления по сравнению с разомкнутой?
8. Что представляет собой механическая характеристика электропривода с замкнутой по скорости системой управления?
9. Какие меры следует принять в системе управления, чтобы повысить диапазон регулирования электропривода?
10. Что дает с точки зрения улучшения статических характеристик привода введение отрицательной обратной связи по скорости?

5.1. Электромеханические характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения

Двигатели постоянного тока традиционно являются основой регулируемого электропривода и широко применяются во всех областях техники. Только в последние годы началось интенсивное использование регулируемых электроприводов на базе двигателей переменного тока.

Двигатели постоянного тока могут иметь независимое, последовательное или смешанное возбуждение. В зависимости от схемы возбуждения существенно разнятся и электромеханические характеристики двигателей.

Двигатели независимого возбуждения могут иметь электромагнитное возбуждение (рис. 5.1, а) и возбуждение от постоянных магнитов (рис. 5.1, б), которые применяют для высокодинамичных двигателей мощностью до 20 кВт.

Реверсирование (изменение направления вращения) двигателей независимого возбуждения осуществляется изменением полярности напряжения, подводимого к якорю двигателя, или напряжения U_b , подводимого к обмотке его возбуждения.

Напряжение U_a , подводимое к якорной цепи двигателя, в установившемся режиме уравнивается падением напряжения

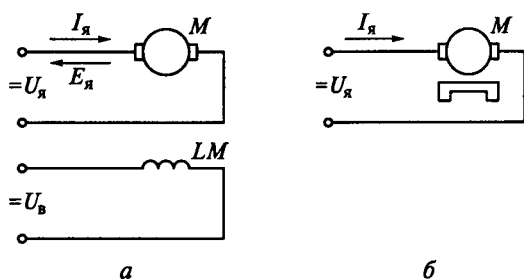


Рис. 5.1. Схема включения двигателей постоянного тока независимого возбуждения:

а — с электромагнитным возбуждением; б — с возбуждением от постоянных магнитов

на сопротивлениях в цепи якоря и противоЭДС якоря, которая наводится в обмотке якоря при его вращении в электромагнитном поле, создаваемом обмоткой возбуждения (см. рис. 5.1, а):

$$U_{\text{я}} = E_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}}. \quad (5.1)$$

Сопротивление якорной цепи

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

где $R_{\text{о.я}}$ — сопротивление обмотки якоря; $R_{\text{д.п}}$ — сопротивление обмотки дополнительных полюсов; $R_{\text{к.о}}$ — сопротивление компенсационной обмотки (если она имеется); $R_{\text{п}}$ — внутреннее сопротивление источника питания двигателя (если оно учитывается).

ЭДС якоря

$$E_{\text{я}} = k\Phi\omega, \quad (5.2)$$

где Φ — поток возбуждения, Вб; $k = p_{\text{п}} N / (2\pi a)$ — конструктивная постоянная двигателя, где $p_{\text{п}}$ — число пар полюсов машины; N — число активных проводников обмотки якоря; a — число параллельных ветвей обмотки якоря.

Момент, развиваемый двигателем, пропорционален току якоря и потоку возбуждения:

$$M = k\Phi I_{\text{я}}. \quad (5.3)$$

Из уравнений (5.1), (5.2) и (5.3) можно получить зависимость скорости от тока якоря $\omega = f(I_{\text{я}})$ — электромеханическую характеристику двигателя — и зависимость скорости от момента двигателя $\omega = f(M)$ — механическую характеристику привода:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{k\Phi}; \quad (5.4)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}} M}{(k\Phi)^2}. \quad (5.5)$$

Если двигатель во всех режимах работает с постоянным потоком возбуждения, то величину $k\Phi$ считают постоянной:

$$k\Phi = C. \quad (5.6)$$

Тогда уравнения (5.2)...(5.5) будут соответственно иметь вид

$$E_{\text{я}} = C\omega, \quad (5.7)$$

$$M = CI_{\text{я}}; \quad (5.8)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C} - \frac{R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{C}; \quad (5.9)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C} - \frac{R_{\text{я}} M}{C^2}. \quad (5.10)$$

Строго говоря, при изменении нагрузки на валу, когда изменяется ток якоря, поток двигателя вследствие размагничивающего влияния реакции якоря не остается постоянным. Для устранения влияния тока в цепи якоря на поток возбуждения на крупных машинах используют компенсационную обмотку, которая включается последовательно с обмоткой якоря и располагается на полюсах машины, усиливая поток возбуждения. Однако и для некомпенсированных машин в инженерных расчетах обычно пренебрегают размагничивающим действием реакции якоря, полагая что линейность механической характеристики двигателя обеспечивается замкнутыми системами регулирования. В двигателях с возбуждением от постоянных магнитов реакция якоря практически не проявляется.

Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения показана на рис. 5.2.

Для рассматриваемых двигателей жесткость естественной механической характеристики

$$\beta = \frac{C^2}{R_{\text{я}}} = \frac{(k\Phi)^2}{R_{\text{я}}}. \quad (5.11)$$

Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения представляют собой прямые, пересекающие ось ординат в точке идеального холостого хода ω_0 , величина которой равна

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} = \frac{U_{\text{я}}}{C}. \quad (5.12)$$

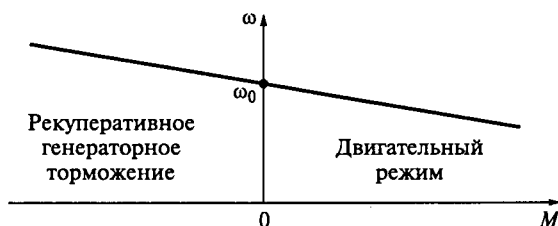


Рис. 5.2. Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения

С учетом (5.11) получим уравнение механической характеристики при постоянном потоке возбуждения:

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta}. \quad (5.13)$$

Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения может проводиться тремя способами:

- 1) введением добавочного резистора в цепь якоря;
- 2) изменением напряжения питания якорной цепи двигателя при постоянном потоке возбуждения;
- 3) изменением тока возбуждения, т. е. изменением магнитного потока двигателя.

При введении добавочного резистора в цепь якоря скорость холостого хода ω_0 остается неизменной, а изменяется наклон механических характеристик, т. е. уменьшается их жесткость (рис. 5.3). Данный способ регулирования скорости в настоящее время не используется, поскольку введение добавочного резистора сопряжено с потерями энергии в этом сопротивлении.

Основным способом регулирования скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ—НВ) является регулирование напряжения, подводимого к якорю двигателя (рис. 5.4). При этом скорость можно лишь уменьшать по сравнению с номинальной скоростью, определяемой естественной характеристикой. При уменьшении напряжения якоря уменьшается скорость холостого хода ω_0 , а жесткость механических характеристик остается постоянной. Повышение напряжения питания выше номи-

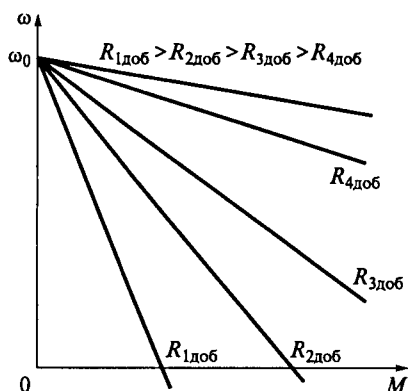


Рис. 5.3. Реостатные механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

$R_{1доб}, \dots, R_{4доб}$ — сопротивления ступеней резистора в якорной цепи двигателя

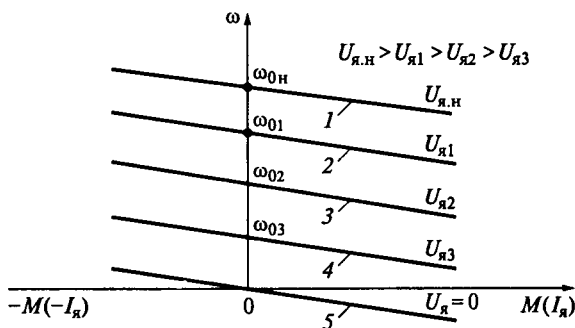


Рис. 5.4. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при регулировании напряжения якоря:

1 — естественная; 2... 5 — регулировочные; $\omega_{0н}, \omega_{01}, \dots, \omega_{03}$ — скорость холостого хода, соответствующая номинальному напряжению якоря $U_{я.н}$ и пониженному напряжению $U_{я1}, \dots, U_{я3}$

нального не рекомендуется, так как это может ухудшить коммутацию на коллекторе.

Плавность регулирования, отсутствие дополнительных потерь энергии при регулировании и высокая жесткость механических характеристик составляют основные достоинства этого способа регулирования скорости.

Повышение скорости по сравнению с номинальной проводится уменьшением тока (потока) возбуждения. При уменьшении

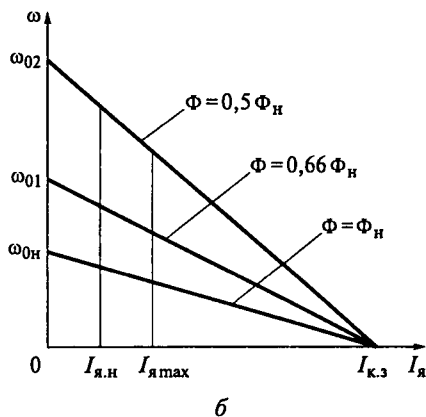
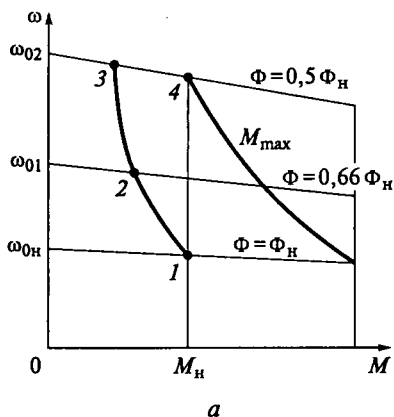


Рис. 5.5. Механические (а) и электромеханические (б) характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при уменьшении потока возбуждения и номинальном напряжении якоря:

$I_{я.н}, I_{к.з}$ — ток якоря соответственно номинальный и короткого замыкания; $\Phi_н$ — номинальный поток возбуждения

магнитного потока Φ согласно (5.5) происходит увеличение скорости холостого хода ω_0 и одновременно снижается жесткость механических характеристик двигателя (рис. 5.5, а).

Увеличение тока возбуждения выше номинального нецелесообразно, так как вследствие насыщения магнитной цепи машины существенного возрастания магнитного потока не произойдет, а тепловой режим двигателя нарушится. Электромеханические характеристики двигателя при ослаблении поля $\omega = f(I_{\text{я}})$ показаны на рис. 5.5, б. Эти характеристики, как следует из (5.4), на оси абсцисс сходятся в одной точке, соответствующей току короткого замыкания $I_{\text{к.з}} = U_{\text{я}}/R_{\text{я}}$.

При анализе механических характеристик при ослаблении поля следует иметь в виду, что при работе с постоянным статическим моментом ток якоря по мере ослабления потока увеличивается. Так, если статический момент на валу двигателя будет равен номинальному, то при номинальном напряжении якоря $U_{\text{я.н}}$ двигатель будет работать в точке 1 (см. рис. 5.5, а). Если, например, ослабить поток возбуждения в 2 раза, то скорость холостого хода двигателя ω_{02} увеличивается в 2 раза. Если момент двигателя сохранится постоянным и равным номинальному, то двигатель будет работать в точке 4. Однако, как это следует из (5.3), ток якоря при этом увеличится в 2 раза. Поэтому длительная работа двигателя в точке 4 недопустима. Из этого примера следует, что одновременно с повышением скорости необходимо снижать длительно допустимый по условиям нагрева (номинальный) момент. Линия номинального момента при ослаблении поля отображается кривой 1—2—3. Аналогично при ослаблении поля уменьшается допустимый максимальный момент, определяемый по условиям коммутации на коллекторе. Поскольку при ослаблении поля скорость увеличивается примерно пропорционально степени ослабления поля $\Phi_{\text{н}}/\Phi_{\text{осл}}$ ($\Phi_{\text{н}}$, $\Phi_{\text{осл}}$ — потоки соответственно номинальный и ослабленный), а длительно допустимый момент $M_{\text{доп}}$ уменьшается пропорционально отношению $\Phi_{\text{осл}}/\Phi_{\text{н}}$, то длительно допустимая мощность двигателя $P_{\text{доп}} = M_{\text{доп}}\omega$ остается примерно постоянной. Поэтому регулирование ослаблением поля называют регулированием с постоянной мощностью в отличие от регулирования изменением напряжения якоря при постоянном потоке возбуждения, которое называют регулированием с постоянным моментом.

Для электроприводов многих механизмов используют комбинированное управление — двухзонное регулирование скорости. Механические характеристики для этого способа управления показаны на рис. 5.6. В зоне I скорость двигателя в диапазоне от нуля до номинальной скорости $\omega_{0\text{н}}$ регулируется изменением напряжения якоря при постоянном потоке возбуждения $\Phi_{\text{н}}$. В зоне II регулирование производится изменением тока (потока) возбуждения при постоянном номинальном напряжении якоря. Соответствен-

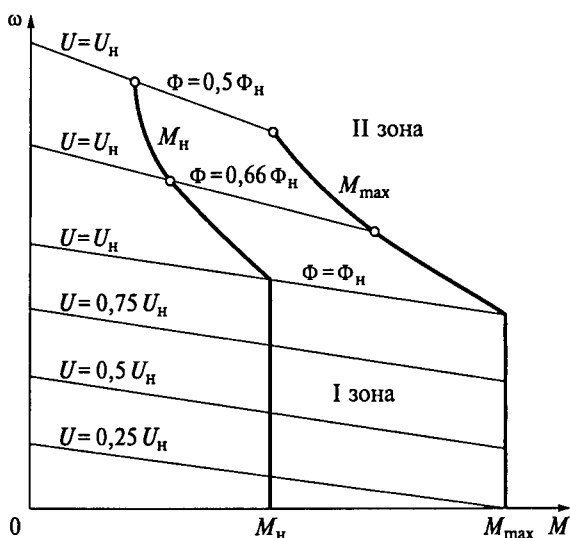


Рис. 5.6. Механические характеристики при двухзонном регулировании скорости двигателя постоянного тока

но номинальный момент в зоне I регулирования остается постоянным, а в зоне II снижается пропорционально уменьшению потока. Максимально допустимая скорость двигателя при ослаблении поля определяется механической прочностью якоря и условиями коммутации на коллекторе. Эта скорость указывается в каталоге на двигатели.

Ослабление поля используется и при однозонном регулировании скорости для установления основной (максимальной) скорости. В отличие от синхронных и асинхронных двигатели постоянного тока не имеют жестко определенной номинальной скорости. В каталогах указывают номинальную и максимальную скорости. Например, если указано, что двигатель мощностью 100 кВт имеет номинальную скорость 1000 мин^{-1} и максимальную 2000 мин^{-1} , то номинальная скорость, например 1600 мин^{-1} , может быть установлена в этих пределах выбором соответствующего значения тока возбуждения. При этом мощность двигателя останется равной 100 кВт. Это удобно при конструировании кинематической схемы рабочей машины.

Для высокودинамичных электроприводов небольшой мощности (до 20 кВт) эффективно использование высокомоментных двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Благодаря применению высокоэнергетических постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов (например, сплава самарий — кобальт) эти двигатели особенно при малых скоростях (когда условия коммутации тока на коллекторе более лег-

кие) способны развивать большой крутящий момент. Отношение пускового момента такого двигателя к номинальному составляет 8...10, в то время как у двигателей с электромагнитным возбуждением это отношение не превышает 2...4. Двигатели находят применение в металлорежущих станках с числовым программным управлением, в приводах роботов и следящих электроприводах различного назначения.

В некоторых случаях двигатели независимого возбуждения снабжают «легкой» обмоткой последовательного возбуждения, создающей при номинальном токе якоря МДС, равную около 20 % от МДС обмотки независимого возбуждения. Высокодинамичные двигатели смешанного возбуждения применяют в случаях многодвигательного привода, когда два или несколько двигателей работают на один вал или их валы связаны механически (например, лентой конвейера). В этом случае скорость всех двигателей будет одинаковой, но из-за неидентичности характеристик двигателя распределение нагрузки между ними неравномерно. Благодаря наличию последовательной обмотки возбуждения в более нагруженном двигателе увеличивается поток и возрастает противоЭДС якоря, что ведет к снижению тока якоря. Менее нагруженный двигатель будет иметь несколько меньший поток, его ЭДС будет ниже, и ток якоря соответственно возрастет. Таким образом, благодаря наличию «легкой» последовательной обмотки происходит выравнивание тока якоря между двигателями, питающимися от общего источника напряжения.

Электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения могут работать в трех тормозных режимах: режиме рекуперативного торможения, динамического торможения и торможения противовключением.

Режим рекуперативного генераторного торможения имеет место, когда скорость двигателя превышает скорость холостого хода, т.е. $\omega > \omega_0$ (рис. 5.7). При этом ЭДС якоря E_a превышает напряжение питания якорной цепи ($E_a > U_a$) и ток в якорной цепи пойдет под действием ЭДС якоря E_a ; знак тока будет противоположен знаку напряжения питания. Это означает, что энергия торможения отдастся в сеть питания постоянного тока. Следовательно, существуют три условия существования режима рекуперативного торможения:

- 1) цепь питания должна обеспечивать возможность протекания тока навстречу напряжению источника питания; это условие особенно важно в случае питания двигателя постоянного тока от полупроводниковых преобразователей, элементы которых обладают односторонней проводимостью тока;

- 2) источник питания должен быть способен воспринимать отдаваемую двигателем энергию и передавать ее в сеть питания; режим рекуперативного торможения невозможен, если привод получает питание от автономной дизель-генераторной установки;

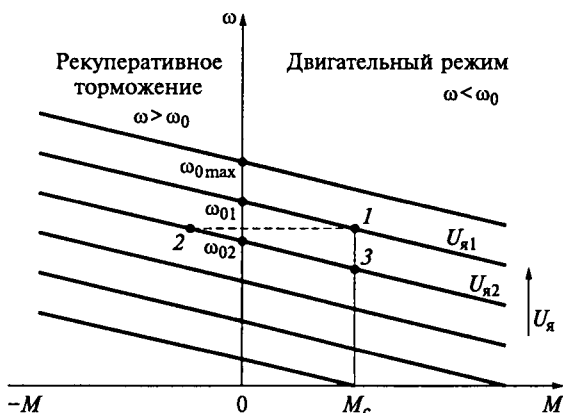


Рис. 5.7. Механические характеристики двигателя постоянного тока в двигательном режиме и режиме рекуперативного торможения

3) для того чтобы рекуперативное торможение было возможно в пределах заданного диапазона регулирования скорости, регулирование должно проводиться путем изменения напряжения, подводимого к якорной цепи двигателя.

Учитывая, что в режиме рекуперативного торможения ток $I_{\text{я}}$ и момент M будут отрицательны, уравнения (5.1) и (5.5) принимают соответственно вид

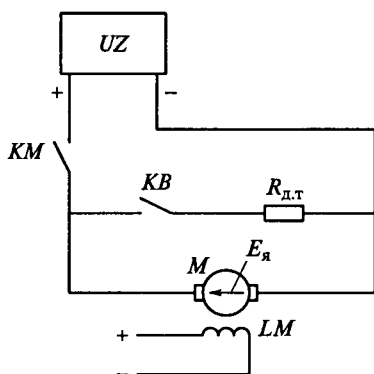
$$E_{\text{я}} = U_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}};$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} + \frac{R_{\text{я}} M}{(k\Phi)^2}.$$

Основные достоинства рекуперативного торможения: энергетическая эффективность, связанная с полезным использованием энергии торможения; высокая жесткость механических характеристик; плавный переход из двигательного в тормозной режим на одной и той же характеристике. Благодаря такому характеру механических характеристик улучшается качество управления приводом.

Предположим, что двигатель работает в точке 1 (см. рис. 5.7) в двигательном режиме со статическим моментом $M_{\text{с}}$. Если оператор хочет уменьшить скорость, он уменьшает напряжение источника питания с $U_{\text{я}1}$ до $U_{\text{я}2}$. Скорость двигателя из-за механической инерции мгновенно не может измениться, и двигатель переходит на работу в точке 2. При этом на валу двигателя возникает тормозной момент, равный сумме тормозного момента двигателя и статического момента. Скорость двигателя быстро снижается до скорости ω_{02} и далее под действием статического момента до скорости, определяемой точкой 3, где $M = M_{\text{с}}$.

Рис. 5.8. Схема динамического торможения двигателя постоянного тока независимого возбуждения



Вторым возможным тормозным режимом является режим динамического торможения. В этом режиме якорь двигателя отключается от источника постоянного тока (рис. 5.8) и замыкается на резистор динамического торможения $R_{д.т}$. Питание обмотки возбуждения при этом должно быть обязательно сохранено. В указанном режиме двигатель M работает как генератор постоянного тока, нагруженный на резистор $R_{д.т}$. Энергия торможения расходуется на нагрев резистора $R_{д.т}$ и обмоток цепи якоря двигателя.

Механические характеристики при динамическом торможении представлены на рис. 5.9. Если $R_{д.т} = 0$, якорная цепь двигателя будет замкнута накоротко и механическая характеристика (при $\Phi = \Phi_n$) будет иметь жесткость естественной характеристики. При увеличении $R_{д.т}$ жесткость характеристик будет уменьшаться:

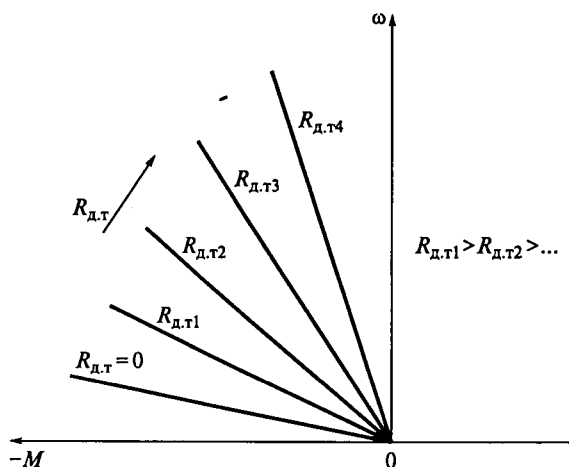


Рис. 5.9. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения в режиме динамического торможения

$\beta = \frac{C^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{д.т}}}$ и механические характеристики будут линейными и расходятся «веером» из начала координат.

Как следует из (5.5), при $U_{\text{я}} = 0$ уравнение механических характеристик динамического торможения будет таким:

$$\omega = -\frac{(R_{\text{я}} + R_{\text{д.т}})}{(k\Phi)^2} M.$$

Недостатки режима динамического торможения: потери энергии торможения, расходуемой на нагрев элементов привода; невозможность торможения привода до его полного останова.

Достоинством режима динамического торможения является его высокая надежность, определяемая тем, что этот режим может осуществляться при исчезновении напряжения питания и в случае выхода из строя источника питания цепи якоря, когда режим рекуперативного торможения становится невозможен. Исходя из этого, динамическое торможение в приводах постоянного тока часто используется в качестве средства аварийного торможения.

Торможение противовключением нехарактерно для двигателей постоянного тока независимого возбуждения. Этот режим может использоваться в приводах малой мощности с широтно-импульсным регулятором тока, позволяющим ограничить ток торможения допустимым значением.

5.2. Электроприводы по системе «тиристорный преобразователь — двигатель постоянного тока»

Для питания двигателей постоянного тока независимого возбуждения используют регулируемые источники питания:

- электромашинные агрегаты: генератор постоянного тока — двигатель переменного тока (система Г—Д);
- тиристорный преобразователь (выпрямитель) с фазовым управлением (система ТП—Д);
- полупроводниковые выпрямители с регулированием выпрямленного напряжения методом широтно-импульсного регулирования (ШИР-Д).

Система Г—Д, в которой двигатель постоянного тока получает питание от электромашинного агрегата, в настоящее время в стационарных установках не применяется. Эта система продолжает использоваться для мобильных установок, например экскаваторов.

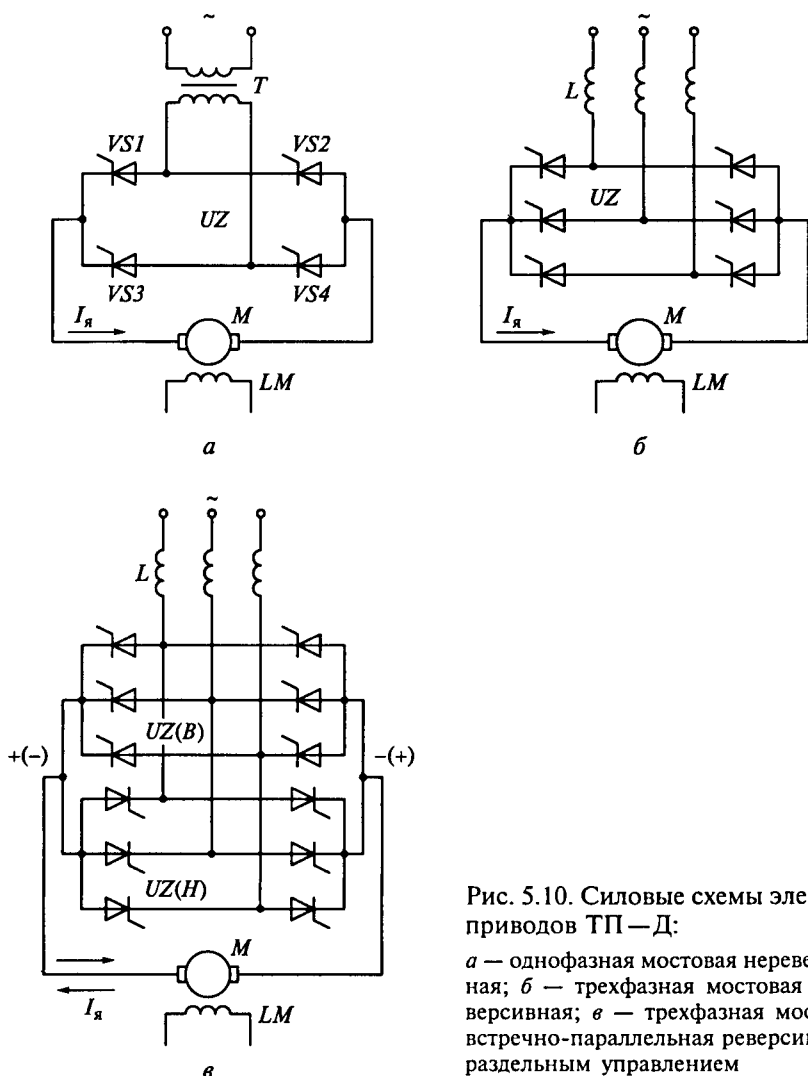


Рис. 5.10. Силовые схемы электроприводов ТП—Д:

a — однофазная мостовая нереверсивная; *б* — трехфазная мостовая нереверсивная; *в* — трехфазная мостовая встречно-параллельная реверсивная с отдельным управлением

Основной системой регулируемого электропривода с двигателями постоянного тока является система ТП—Д, наиболее распространенные схемы которой приведены на рис. 5.10.

Основу схем тиристорных преобразователей составляют полупроводниковые приборы — тиристоры. Неполная управляемость тиристоров определяется тем, что включение тиристора контролируется системой импульсно-фазового управления (СИФУ). При подаче открывающего импульса на управляющий электрод тиристора он открывается и остается откры-

тым после снятия отпирающего импульса. Закрывается тиристор после изменения полярности напряжения анод — катод и спада тока до нуля. Запирание тириستоров по цепи управления невозможно. Все это относится к однооперационным тиристорам. Существуют запираемые тиристоры, которые допускают запирание по цепи управления, однако эти приборы в системах электропривода ТП — Д пока не применяются.

Тиристорный преобразователь в схемах электропривода постоянного тока выполняет две функции: выпрямление переменного напряжения питающей сети и регулирование среднего выпрямленного напряжения.

Принцип регулирования среднего выпрямленного напряжения тиристорного преобразователя с импульсно-фазовым управлением рассмотрим на примере однофазной мостовой схемы (рис. 5.10, а).

Если отпирающие импульсы на тиристоры $VS1$ и $VS4$ (и соответственно тиристоры $VS3$ и $VS2$ при другой полуволне синусоиды питающего напряжения) подаются в момент естественного открывания, когда напряжение катод — анод становится положительным, то среднее выпрямленное напряжение E_{d0} , определяе-

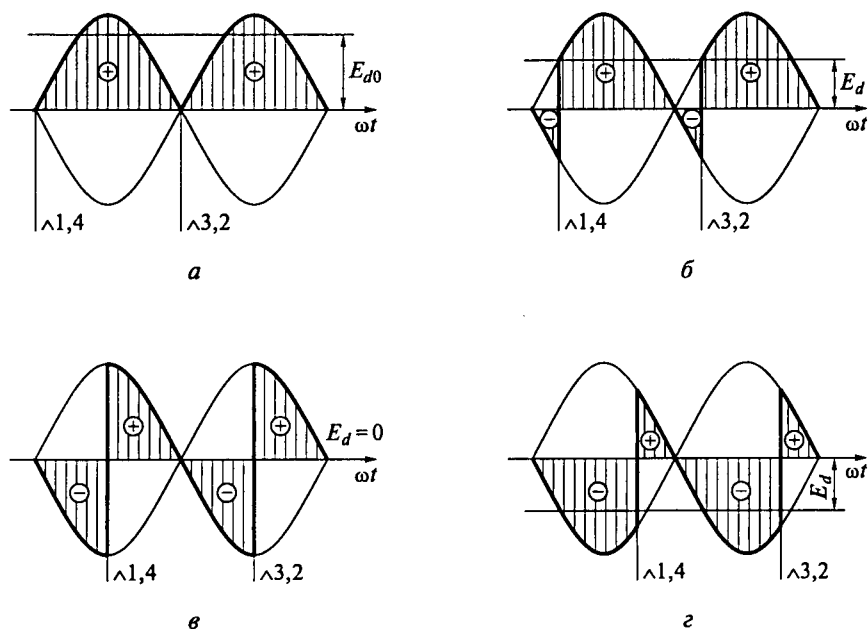


Рис. 5.11. Эпюры напряжений однофазного мостового тиристорного преобразователя:

а — при $\alpha = 0$; б — при $\alpha = \pi/4$; в — при $\alpha = \pi/2$; г — при $\alpha = 3\pi/4$

мое заштрихованной площадью на рис. 5.11, а, будет максимальным и равным

$$E_{d0} = k_{cx} U_{л}, \quad (5.14)$$

где k_{cx} — коэффициент схемы выпрямления, для однофазной мостовой схемы $k_{cx} = 0,9$, для трехфазной мостовой схемы $k_{cx} = 1,35$, для трехфазной нулевой схемы $k_{cx} = 0,675$; $U_{л}$ — линейное напряжение на стороне переменного тока.

Если отпирающие импульсы на тиристоры будут подаваться с запаздыванием относительно момента естественного открывания на угол α (угол управления тиристорами), то среднее выпрямленное напряжение преобразователя будет уменьшаться (рис. 5.11, б, в). При этом тиристоры $VS1$ и $VS4$ (см. рис. 5.10, а) будут проводить ток до тех пор, пока не откроются тиристоры $VS3$ и $VS2$, т.е. и в то время, когда напряжение катод — анод будет отрицательным. Это объясняется тем, что в цепи выпрямленного тока имеется достаточно большая индуктивность обмотки якоря двигателя $L_{я}$, и ток будет протекать под действием ЭДС самоиндукции. Если же в цепи выпрямленного тока не было бы индуктивности (чисто активная нагрузка), то ток прекратился бы при переходе анодного напряжения через нуль; ток в этом случае был бы прерывистым. При большом значении индуктивности $L_{я}$ соотношение между средним выпрямленным напряжением E_d преобразователя и углом α будет таким [4]:

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha. \quad (5.15)$$

Среднее выпрямленное напряжение определяется разностью заштрихованных площадей (см. рис. 5.11, б...е). При угле $\alpha = \pi/2$ среднее выпрямленное напряжение (см. рис. 5.11, в) будет равно нулю.

Тиристорный преобразователь может работать в выпрямительном и в инверторном режимах. Выпрямительный режим имеет место при $\alpha = 0 \dots \pi/2$. При этом среднее выпрямленное напряжение должно быть больше ЭДС в цепи выпрямленного тока (противоЭДС якоря двигателя): $E_d > E_{я}$. Направление выпрямленного тока совпадает со знаком выпрямленного напряжения преобразователя.

Если $\alpha = \pi/2 \dots 11/12\pi$, то площадь отрицательной полуволны, при которой открыты тиристоры, будет больше площади положительной полуволны и, следовательно, среднее выпрямленное напряжение преобразователя будет отрицательным, что следует также из формулы (5.15). Возникает инверторный режим работы преобразователя, который может быть использован для обеспечения рекуперативного торможения привода.

Под действием отрицательного напряжения преобразователя ток протекать не может из-за односторонней проводимости тири-

стором. Поэтому инверторный режим преобразователя возможен при соблюдении трех условий:

1) в цепи выпрямленного тока должен быть источник ЭДС, которая выше средней выпрямленной противоЭДС инвертора; в схемах тиристорного привода постоянного тока ЭДС якоря двигателя должна быть больше E_d инвертора: $E_a > |E_d|$;

2) источник ЭДС (якорь двигателя) должен быть так подключен к преобразователю, чтобы было возможно протекание тока под действием ЭДС якоря;

3) угол управления тиристорами должен быть больше $\pi/2$, т.е. $\alpha > \pi/2$.

При соблюдении этих условий двигатель постоянного тока будет работать в генераторном режиме, вырабатывая энергию постоянного тока, которая преобразуется тиристорным преобразователем в энергию переменного тока и отдается в сеть питания. Электропривод ТП—Д, в котором двигатель питается от двух встречно включенных преобразователей, называется реверсивным (см. рис. 5.10, в).

Как источник напряжения постоянного тока тиристорный преобразователь характеризуется ЭДС E_d , регулируемой посредством угла управления α , и внутренним сопротивлением преобразователя

$$R_{\pi} = R_a + R_y, \quad (5.16)$$

где R_a — активное сопротивление источника питания (сетевого реактора или трансформатора); R_y — условное сопротивление, связанное с падением напряжения в процессе коммутации тиристором.

Преобразователи подсоединяются к сети питания или через трансформатор, служащий для согласования напряжений сети питания и двигателя, или через сетевой реактор.

Сетевые реакторы в бестрансформаторных схемах питания выполняют две функции: ограничивают ток короткого замыкания в преобразователе и уменьшают негативное влияние преобразователя на питающую сеть. И трансформаторы, и реакторы обладают активным и индуктивным сопротивлением.

Активное сопротивление фазы трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке,

$$R_T = \frac{\Delta P_{к.з}}{3I_{2ф}^2},$$

где $\Delta P_{к.з}$ — потери короткого замыкания трансформатора; $I_{2ф}$ — номинальный фазный ток вторичной обмотки трансформатора.

Сопротивление R_T может быть определено по паспортным данным трансформатора.

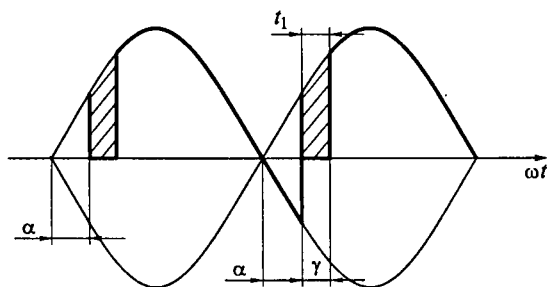


Рис. 5.12. Эпюра напряжения при коммутации тока между тиристорами в однофазном мостовом преобразователе

Эпюра напряжения при коммутации тиристоров приведена на рис. 5.12. Пусть преобразователь работает с углом α . До момента t_1 ток проводят тиристоры $VS1$ (см. рис. 5.10, а) и $VS4$. В момент времени t_1 подаются отпирающие импульсы на тиристоры $VS3$ и $VS2$. Последние отпираются. Однако из-за наличия индуктивности на стороне сети ток через тиристоры $VS1$ и $VS4$ не может мгновенно упасть до нуля, и в течение некоторого времени, определяемого углом коммутации γ (см. рис. 5.12), одновременно будут открыты все четыре вентиля, которые шунтируют цепь нагрузки. В результате среднее выпрямленное напряжение снижается на значение, пропорциональное заштрихованной площади. Это падение напряжения ΔU_γ зависит от выпрямленного тока I_d :

$$\Delta U_\gamma = \frac{m}{2\pi} x_a I_d.$$

Условно величину $\frac{m}{2\pi} x_a$ можно считать некоторым сопротивлением R_y , вызывающим падение напряжения в преобразователе:

$$R_y = \frac{m}{2\pi} x_a, \quad (5.17)$$

где m — число коммутаций за период; x_a — индуктивное сопротивление в цепи переменного тока.

Индуктивное сопротивление

$$x_a \approx \frac{U_{2\phi} e_\kappa}{100 I_{2\phi}},$$

где $U_{2\phi}$ — фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора; e_κ — относительное напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Таблица 5.1. Основные показатели схем выпрямления

Схема	$k_{cx} = E_{d0}/U_{\pi}$	$\frac{U_{T \max}}{E_{d0}}$	$\frac{I_1}{I_d}$	$\frac{S_T}{E_{d0} I_{dн}}$	$\frac{R_a}{R_r}$	m
Однофазная мостовая	0,9	1,57	1,0	1,11	1	2
Трехфазная мостовая	1,35	1,045	0,815	1,045	2	6

Обозначения: E_{d0} — выпрямленная ЭДС преобразователя; U_{π} — линейное напряжение в цепи трансформатора; $U_{T \max}$ — максимальное напряжение, прикладываемое к тиристорам; I_1 — ток в линии в цепи переменного тока; I_d — выпрямленный ток трансформатора; S_T — мощность трансформатора; $I_{dн}$ — номинальный выпрямленный ток трансформатора; R_a — активное сопротивление в цепи переменного тока; R_r — сопротивление вторичной обмотки трансформатора (или реактора).

Падение напряжения на сопротивлении R_y не связано с потерями мощности в нем, поскольку оно вызвано индуктивным сопротивлением в цепях переменного тока; оно уменьшает коэффициент мощности преобразователя. Соотношения между токами, напряжениями и сопротивлениями для двух наиболее распространенных схем выпрямления приведены в табл. 5.1.

Таким образом, среднее напряжение преобразователя в режиме непрерывного тока (внешняя характеристика преобразователя как источника напряжения)

$$U_d = E_{d0} \cos \alpha - I_d R_{\pi}. \quad (5.18)$$

Выпрямленный ток имеет непрерывный характер, если индуктивность в цепи выпрямленного тока достаточно велика, т.е. $L_d \rightarrow \infty$. Если ток якоря принимает прерывистый характер, тогда механические характеристики привода становятся нелинейными (рис. 5.13).

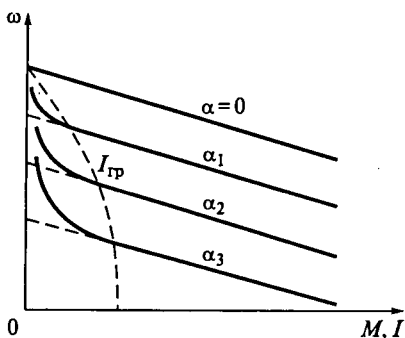


Рис. 5.13. Механические характеристики неперерывного привода ТП—Д

Индуктивность якорной цепи двигателя постоянного тока независимого возбуждения может быть определена по формуле

$$L_{\text{я}} = k_L \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}} p_{\text{н}} \omega_{\text{н}}}, \quad (5.19)$$

где k_L — конструктивный коэффициент; для компенсированных машин принимают $k_L = 0,1 \dots 0,25$, для некомпенсированных $k_L = 0,5 \dots 0,6$.

При конечных значениях индуктивности в цепи выпрямленного тока на условие непрерывности тока оказывают также влияние значения тока и угла регулирования. Граничное (минимальное) значение тока, при котором ток еще остается непрерывным, определяется соотношением

$$I_{\text{гп}} = \frac{E_{d0} \sin \alpha}{314 L_d} \left(1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m}\right). \quad (5.20)$$

Влияние режима прерывистого тока проявляется в увеличении среднего выпрямленного напряжения в зоне прерывистого тока. Механические характеристики неререверсивного привода ТП—Д показаны на рис. 5.13.

Наиболее часто применяемые силовые схемы тиристорных электроприводов постоянного тока ТП—Д показаны на рис. 5.10. Их показатели даны в табл. 5.1. Схемы на рис. 5.10, а, б относятся к неререверсивным электроприводам. В этих схемах изменение полярности напряжения питания и направления тока в якорной цепи невозможны.

Если полагать, что привод работает в режиме непрерывного тока (при $L_d \rightarrow \infty$), то механические характеристики будут наклонными прямыми, параллельными друг другу (см. рис. 5.13), причем ω_0 уменьшается по мере уменьшения выпрямленного напряжения (увеличения угла α).

Механические характеристики описываются в этом случае следующей формулой, полученной на основе (5.5):

$$\omega = \frac{E_{d0} \cos \alpha}{k\Phi} - \frac{(R_{\text{я}} + R_{\text{н}})}{k\Phi^2} M. \quad (5.21)$$

При конечных значениях индуктивности якорной цепи L_d в области малых значений момента (тока якоря) — левее граничной линии $I_{\text{гп}}$ — механические характеристики загибаются вверх. Это является следствием перехода в зону прерывистых токов. Линия, определяющая границу непрерывного тока, определяется уравнением (5.20).

Если необходимо последовательно с якорем двигателя уменьшить зону прерывистых токов, включают сглаживающий дроссель, индуктивность которого может быть определена по формуле

$$L_d \geq \frac{E_{d0}}{(2\pi)f_c I_{гр}} \left(1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} \right) - L_{я}, \quad (5.22)$$

где f_c — частота сети питания; $I_{гр}$ — требуемый граничный ток при $\omega = 0$.

Механические характеристики неререверсивного привода ТП—Д не пересекают ось ординат, так как изменение направления тока в неререверсивных схемах невозможно. Следовательно, отсутствует режим рекуперативного торможения. В случае необходимости изменения направления вращения приводного двигателя в неререверсивных приводах по системе ТП—Д изменяют направление тока в обмотке возбуждения двигателя.

Для того чтобы получить электропривод, работающий во всех четырех квадрантах поля « $M-\omega$ », необходимо использовать реверсивный тиристорный преобразователь, обеспечивающий протекание тока якоря в обоих направлениях. Реверсивные тиристорные преобразователи содержат две группы тириستоров, включенные встречно-параллельно по отношению друг к другу. Наиболее распространенная схема реверсивного тиристорного электропривода показана на рис. 5.10, в. В этой схеме два тиристорных преобразователя $UZ(B)$ и $UZ(H)$, собранные каждый по трехфазной мостовой схеме, включены параллельно друг другу с противоположной полярностью на стороне выпрямленного тока. Подавать отпирающие импульсы одновременно на обе группы тиристоров нельзя, так как произойдет короткое замыкание. Поэтому в данной схеме может работать только одна группа тиристоров $UZ(B)$ или $UZ(H)$; другая группа должна быть закрыта (отпирающие импульсы сняты). Такая реверсивная схема называется схемой с раздельным управлением группами тиристоров.

При раздельном управлении включается только та группа тиристоров, которая в данный момент должна проводить ток. Выбор этой группы зависит от направления движения привода («Вперед» или «Назад») и от режима работы (двигательный режим или рекуперативное торможение). Необходимую группу вентиля можно выбрать по табл. 5.2.

В системах управления выбор и включение нужной группы тиристоров проводится автоматически посредством логического переключающего устройства (ЛПУ), схема работы которого показана на рис. 5.14.

Примем направление тока якоря при работе «Вперед» в двигательном режиме за положительное. При положительном сигнале задания скорости $\omega_{зад}$, соответствующем движению вперед, и сиг-

Таблица 5.2. Группы тиристоров, работающие в зависимости от направления движения и режима работы (см. рис. 5.10, в)

Направление движения	Режим работы	
	Двигательный	Тормозной
Вперед	$UZ(B)$	$UZ(H)$
Назад	$UZ(H)$	$UZ(B)$

нале ошибки по скорости, которая в двигательном режиме также будет $(\omega_{\text{зад}} - \omega) \geq 0$, сигнал, поступающий на ЛПУ от регулятора тока, будет иметь знак (+). В соответствии с этим ЛПУ включит электронный ключ $KL(B)$, который подает отпирающие импульсы на тиристорную группу $UZ(B)$. Угол управления α_B устанавливается системой автоматического регулирования в соответствии с сигналом выхода регулятора тока (РТ). СИФУ-В и СИФУ-Н, управляющие соответственно группами тиристоров $UZ(B)$ и $UZ(H)$, работают согласованно, так что

$$\alpha_B + \alpha_H = \pi, \quad (5.23)$$

где α_B, α_H — углы управления соответственно группами тиристоров $UZ(B)$ и $UZ(H)$.

Таким образом, на тиристорную группу, работающую в выпрямительном режиме, подаются отпирающие импульсы с $\alpha_B = 0 \dots \pi/2$. При этом СИФУ-Н вырабатывает импульсы управления с углом $\alpha_H = \pi - \alpha_B$, т.е. с углом управления, соответствующим инверторному режиму работы преобразователя $UZ(H)$. Однако, поскольку электронный ключ $KL(H)$ разомкнут, импульсы управления на тиристоры группы $UZ(H)$ не поступают. Преобразователь $UZ(H)$ закрыт, но подготовлен к работе в инверторном режиме.

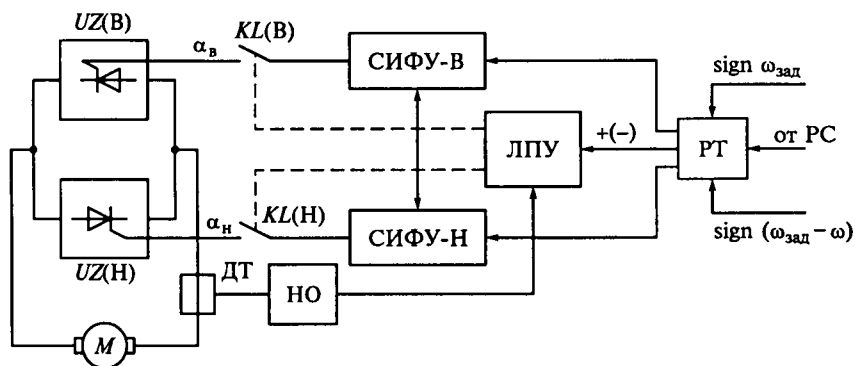


Рис. 5.14. Схема работы логического переключающего устройства

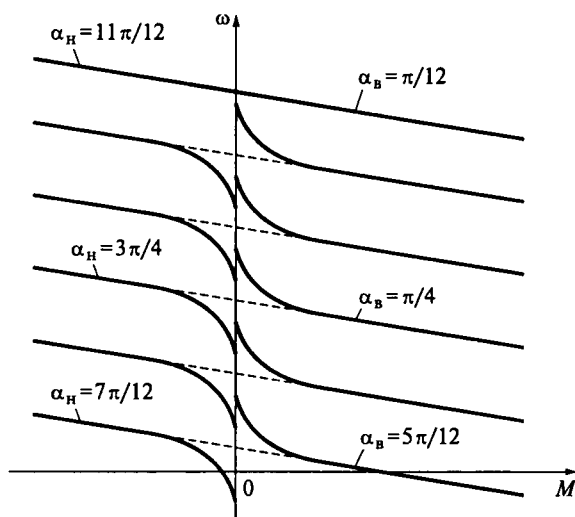


Рис. 5.15. Механические характеристики реверсивного привода ТП — Д с раздельным согласованным управлением

Такой принцип согласованного управления (см. (5.23)) позволяет согласовать механические характеристики привода в двигательном и тормозном режимах (рис. 5.15).

При необходимости торможения привода уменьшается сигнал задания скорости $\omega_{\text{зад}}$. Ошибка по скорости меняет знак, т.е. $(\omega_{\text{зад}} - \omega) < 0$, и на входе ЛПУ (см. рис. 5.14) знак сигнала изменяется с (+) на (-), в соответствии с чем отключается контакт $KL(B)$ и включается контакт $KL(H)$. Однако включение контакта $KL(H)$ происходит не сразу, а с некоторой выдержкой времени, которая необходима, чтобы ток якоря уменьшился до нуля и тиристоры $UZ(B)$ восстановили запирающие свойства. Спадание тока до нуля контролируется датчиком тока (ДТ) и нуль-органом (НО) (в других схемах для этой цели используются датчики проводимости вентилей (ДПВ)).

Когда ток спадет до нуля, по прошествии некоторой выдержки времени включается ключ $KL(H)$ и вступает в работу преобразователь $UZ(H)$, уже подготовленный к работе в инверторном режиме. Привод переходит в режим рекуперативного торможения. Общее время переключения тиристорных групп составляет 5...10 мс, что в большинстве случаев допустимо для обеспечения высокого качества управления.

При работе в двигательном режиме в направлении «Назад» знак задания скорости отрицателен, а значение ошибки по скорости $(\omega_{\text{зад}} - \omega)$ положительно, поэтому на вход ЛПУ поступает отрицательный сигнал и включается ключ $KL(H)$. Работает преобразова-

Таблица 5.3. Правила работы ЛПУ (см. рис. 5.14)

Знак $\omega_{\text{зад}}$	Знак $(\omega_{\text{зад}} - \omega)$	Знак на входе ЛПУ	Включен ключ	Работает преобразователь	Режим работы привода
+	+	+	$KL(B)$	$UZ(B)$	Двигательный
+	–	–	$KL(H)$	$UZ(H)$	Тормозной
–	+	–	$KL(H)$	$UZ(H)$	Двигательный
–	–	+	$KL(B)$	$UZ(B)$	Тормозной

тель $UZ(H)$ в выпрямительном режиме. Логические правила работы ЛПУ приведены в табл. 5.3.

Находят применение также другие схемы ЛПУ. Механические характеристики реверсивного привода ТП—Д с отдельным управлением показаны на рис. 5.15. При непрерывном токе якоря они описываются уравнением (5.21).

В режиме прерывистых токов в области малых значений момента линейность характеристик нарушается. В современных замкнутых по току и скорости системах регулирования благодаря применению адаптивных регуляторов удается линеаризовать механические характеристики и при малых значениях момента.

Тиристорные преобразователи в приводе ТП—Д получают питание либо от трансформаторов, согласующих напряжение питающей сети с номинальным напряжением двигателя постоянного тока, либо, если такое согласование не требуется, — от однофазной или трехфазной сети 380/220 В. В последнем случае на входе преобразователя используются реакторы (см. рис. 5.10).

При трехфазной мостовой схеме преобразователя мощность трансформатора, $\text{kB} \cdot \text{A}$

$$S_{\text{тр}} \geq \frac{K_v U_{\text{дн}} I_{\text{дн}} \cdot 10^{-3}}{\cos \alpha_{\min} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{п}}},$$

где K_v — коэффициент, учитывающий искажение формы тока; $U_{\text{дн}}$, $I_{\text{дн}}$ — номинальные соответственно выпрямленное напряжение и ток трансформатора; $\alpha_{\min}$ — минимальный угол управления тиристорами, соответствующий номинальному выпрямленному напряжению; $\eta_{\text{тр}}$, $\eta_{\text{п}}$ — КПД соответственно трансформатора и КПД преобразователя.

КПД тиристорного электропривода — произведение КПД его узлов, преобразующих энергию:

$$\eta_{\text{ТП—Д}} = \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{п}} \eta_{\text{дв}},$$

где $\eta_{\text{дв}}$ — КПД двигателя.

КПД трансформатора $\eta_{тр} = 0,9 \dots 0,95$, он увеличивается с возрастанием мощности. Потери в тиристорном преобразователе невелики, так как определяются главным образом потерями мощности в полупроводниковых приборах. Для мостовой схемы

$$\Delta P_{п} = 2I_{дн}\Delta U_{тир},$$

где $\Delta U_{тир}$ — падение напряжения на открытом тиристоре, $\Delta U_{тир} \approx 2$ В.

Обычно КПД преобразователя $\eta_{п} = 0,95 \dots 0,98$. Приняв средний КПД двигателя постоянного тока $\eta_{дв} = 0,88$, получим, что при номинальной нагрузке КПД привода ТП—Д $\eta_{ТП-Д} = 0,78 \dots 0,82$, это является высоким показателем.

Недостатками привода ТП—Д с энергетической точки зрения являются низкий средневзвешенный коэффициент мощности и искажение формы тока в сети питания.

Тиристорные преобразователи искажают форму тока в питающей сети переменного тока: делают форму тока отличной от синусоиды. Несинусоидальный ток $I_{нс}$ можно разложить на ток первой гармоники с частотой сети и токи высших гармоник, частота которых превышает частоту сети в $(nm + 1)$ раз, где n — натуральные числа (1, 2, 3 и т. д.); m — число пульсаций выпрямленного напряжения за один период частоты сети. Переменный ток мостовых преобразователей имеет примерно трапецеидальную форму, его можно разложить на сумму тока первой гармоники и токов высших гармоник:

$$I_{нс} = I_{m1} \sin \omega t + I_{m5} \sin(5\omega t + \varphi_5) + I_{m7} \sin(7\omega t + \varphi_7) + \dots$$

Особенно проявляются 5, 7 и 11-я гармоники тока. Мощность, определяемая высшими гармониками тока и напряжением первой гармоники, образует мощность искажения, которая, по существу, является реактивной (ее среднее значение равно нулю). Мощность искажения оказывает вредное воздействие на питающую сеть и потребители электроэнергии, включенные параллельно тиристорному преобразователю. Степень искажения тока оценивают коэффициентом искажения

$$v = \sqrt{\frac{I_{1m}^2}{I_{1m}^2 + I_{3m}^2 + I_{7m}^2 + \dots}}.$$

Для трехфазных мостовых схем $v = 0,95$.

Под коэффициентом мощности тиристорного преобразователя $K_{м.ТП}$ будем понимать произведение коэффициента искажения v на $\cos \varphi$ для первой гармоники тока по отношению к первой гармонике напряжения:

$$K_{м.ТП} = v \cos \varphi_1.$$

Ток в цепи питания тиристорного преобразователя отстает от соответствующего напряжения на угол запаздывания открывания тиристорov (угол управления α). Поэтому можно считать, что

$$\cos \varphi_1 \approx \cos \alpha. \quad (5.24)$$

Так как $\cos \alpha = E_d / E_{d0}$, то при работе привода на высоких скоростях, когда напряжение E_d примерно равно номинальному напряжению якоря двигателя, $\cos \alpha \approx 1$ и коэффициент мощности тиристорного преобразователя будет высоким. По мере снижения скорости будет уменьшаться выпрямленное напряжение преобразователя E_d и соответственно снижаться $\cos \varphi_1$. Можно полагать, что $\cos \varphi_1 \approx \omega / \omega_n$.

Если привод ТП—Д длительное время работает с пониженными скоростями, то средневзвешенный коэффициент мощности будет низким. Поэтому энергетические показатели привода ТП—Д следует оценивать не по номинальному значению, когда $\cos \varphi_1$ высокий, а по его средневзвешенному значению. Особенно низкое значение $\cos \varphi_1$ будет при пуске привода. Поэтому для мощных тиристорных преобразователей пуск сопровождается значительными бросками реактивной мощности.

Исходя из изложенного, рекомендуется совместно с тиристорными преобразователями включать фильтрокомпенсирующие устройства, которые повышают $\cos \varphi$ преобразователей и уменьшают число и амплитуду высших гармоник тока в сети питания, тем самым компенсируя вредное влияние преобразователей на сеть питания.

5.3. Электроприводы с двигателями постоянного тока с последовательным возбуждением

В двигателях постоянного тока с последовательным возбуждением обмотка возбуждения включается (рис. 5.16) последовательно с обмоткой якоря, ток возбуждения равен току якоря и создаваемый им поток Φ пропорционален току якоря:

$$\Phi = a I_{\text{я}}, \quad (5.25)$$

где $a = f(I_{\text{я}})$ — нелинейный коэффициент. Нелинейность этого коэффициента связана с формой кривой намагничивания и размагничивающим действием реакции якоря; оба этих фактора проявляются при $I_{\text{я}} > 0,7 \dots 0,8 I_{\text{я.н}}$ ($I_{\text{я.н}}$ — номинальный ток якоря); при малых токах якоря коэффициент a можно считать величиной постоянной. При $I_{\text{я}} > 2 I_{\text{я.н}}$ двигатель насыщается, и поток мало зависит от тока якоря.

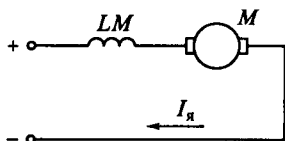


Рис. 5.16. Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

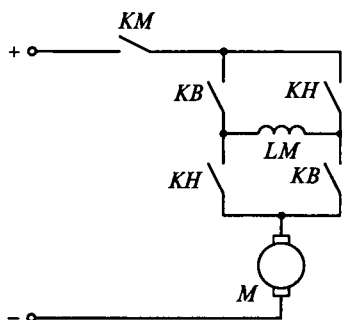


Рис. 5.17. Схема реверсирования двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Зависимость потока возбуждения от тока якоря нагрузки (см. (5.25)) является особенностью электромеханических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

Для изменения направления вращения двигателя последовательного возбуждения недостаточно изменить полярность напряжения, подводимого к двигателю, так как при этом изменятся одновременно и направление тока в обмотке якоря, и полярность потока возбуждения. Поэтому для реверсирования двигателя нужно изменить направление тока в одной из частей машины, например в обмотке возбуждения, оставив направление тока в обмотке якоря неизменным (рис. 5.17).

Подставив (5.25) в (5.2) и (5.3), соответственно получим основные соотношения для рассматриваемых двигателей:

$$E_{\text{я}} = ka I_{\text{я}} \omega \quad (5.26)$$

$$M = ka I_{\text{я}}^2. \quad (5.27)$$

Соответственно уравнения электромеханической и механической характеристик двигателя последовательного возбуждения будут следующими:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{ka I_{\text{я}}} - \frac{R_{\Sigma \text{я}}}{ka}, \text{ или } \omega = \frac{A'}{I_{\text{я}}} - B; \quad (5.28)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\sqrt{ka M}} - \frac{R_{\Sigma \text{я}}}{ka}, \text{ или } \omega = \frac{A}{\sqrt{M}} - B, \quad (5.29)$$

где $R_{\Sigma \text{я}}$ — суммарное сопротивление цепи якоря; $A' = \frac{U_{\text{я}}}{ka}$; $A = \frac{U_{\text{я}}}{\sqrt{ka}}$; $B = \frac{R_{\Sigma \text{я}}}{ka}$.

В первом приближении, если не учитывать насыщение магнитной цепи, механическую характеристику двигателя постоянного тока последовательного возбуждения можно представить в виде гиперболы, не пересекающей ось ординат, а асимптотически приближающуюся к ней.

Если положить $R_{\Sigma\alpha} = 0$, то характеристика 2 (рис. 5.18) не будет пересекать ось абсцисс. Такая характеристика называется идеальной. Выше этой характеристики не может быть характеристик. Реальная естественная характеристика пересекает ось абсцисс в точке, соответствующей току короткого замыкания (момент M_k). Если учитывать насыщение двигателя, то при $M < 0,8 M_k$ характеристика криволинейна и носит гиперболический характер; при больших значениях тока и момента поток вследствие насыщения становится постоянным и характеристика становится прямолинейной.

Отличительной особенностью характеристик двигателя последовательного возбуждения является отсутствие точки идеального холостого хода. При уменьшении нагрузки скорость двигателя существенно возрастает, вследствие чего оставлять двигатель без нагрузки недопустимо.

Важным достоинством двигателей последовательного возбуждения является большая перегрузочная способность на низких скоростях. При перегрузке по току в 2,25...2,5 раза двигатель развивает момент в 3,0...3,5 раза выше номинального. Это определило широкое использование двигателей последовательного возбуждения для электрических транспортных средств, где наибольшие моменты необходимы при трогании с места. Вторым важным достоинством двигателей последовательного возбуждения является отсутствие источника питания для цепи возбуждения двигателя.

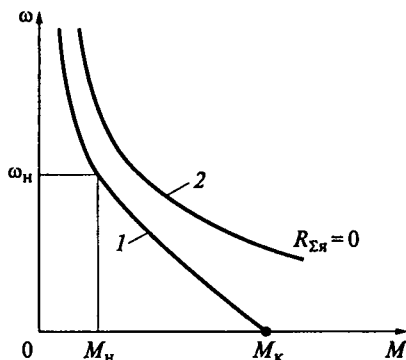


Рис. 5.18. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения:

1 — естественная; 2 — идеальная

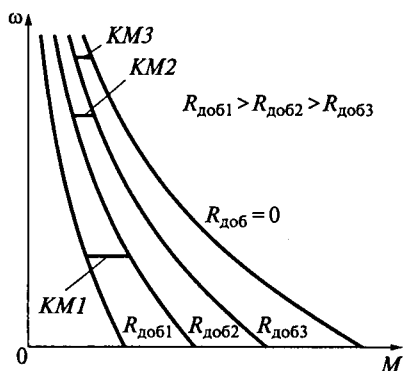


Рис. 5.19. Реостатные механические характеристики двигателя последовательного возбуждения: $R_{доб1}$, $R_{доб2}$, $R_{доб3}$ — сопротивления ступеней добавочного резистора в цепи якоря

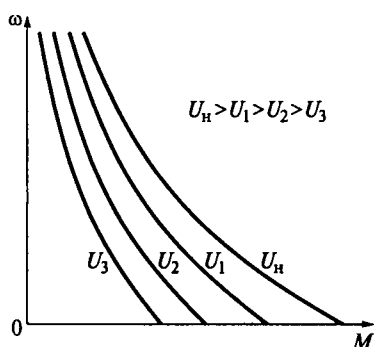


Рис. 5.20. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при изменении напряжения питания

Искусственные механические характеристики могут быть получены тремя способами: включением добавочного резистора в цепь якоря, изменением питающего напряжения питания и шунтированием обмотки якоря добавочным резистором.

При введении добавочного резистора в цепь якоря жесткость механических характеристик уменьшается и уменьшается M_k (рис. 5.19). Этот способ регулирования используется при пуске двигателя, когда ступени резистора переключаются пусковыми контактами $KM1$, $KM2$, $KM3$. На рис. 5.19 показаны пусковые характеристики, соответствующие трехступенчатой схеме пуска. Длительная работа на реостатных характеристиках сопряжена со значительными потерями энергии в резисторе.

Наиболее экономичным способом регулирования скорости двигателя последовательного возбуждения является изменение подводимого к двигателю напряжения. Механические характеристики, соответствующие этому способу регулирования, показаны на рис. 5.20. По мере уменьшения напряжения они смещаются вниз параллельно естественной характеристике. Внешне искусственные характеристики при регулировании изменением напряжения похожи на реостатные характеристики. Однако есть существенная разница в этих способах регулирования. Реостатное регулирование сопряжено с потерей энергии в добавочных резисторах, а при регулировании изменением напряжения дополнительные потери отсутствуют.

Часто питание на двигатели последовательного возбуждения поступает от сети постоянного тока или источника постоянного

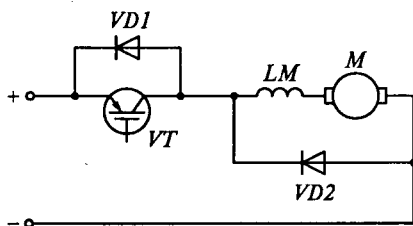


Рис. 5.21. Схема регулируемого электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения и широтно-импульсным регулятором напряжения

тока с нерегулируемым напряжением. Регулирование напряжения на зажимах двигателя в этом случае целесообразно проводить способом широтно-импульсного регулирования. Упрощенная схема регулируемого электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения и широтно-импульсным регулятором напряжения показана на рис. 5.21.

Изменение потока возбуждения в рассматриваемых двигателях возможно, если зашунтировать обмотку якоря резистором с сопротивлением $R_{ш}$ (рис. 5.22, а). В этом случае в соответствии с первым законом Кирхгофа ток возбуждения

$$I_{\text{в}} = I_{\text{я}} + \frac{U}{R_{\text{ш}}},$$

т.е. содержит постоянную составляющую, не зависящую от нагрузки двигателя. При этом двигатель приобретает свойства двигателя смешанного возбуждения — независимого и последовательного. Благодаря независимому возбуждению механические харак-

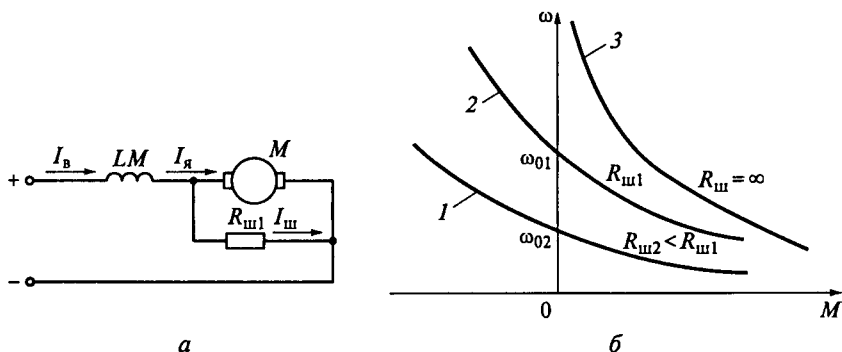


Рис. 5.22. Схема (а) и механические характеристики (б) двигателя последовательного возбуждения при шунтировании обмотки якоря: 1, 2 — при введении шунтирующего резистора; 3 — естественная

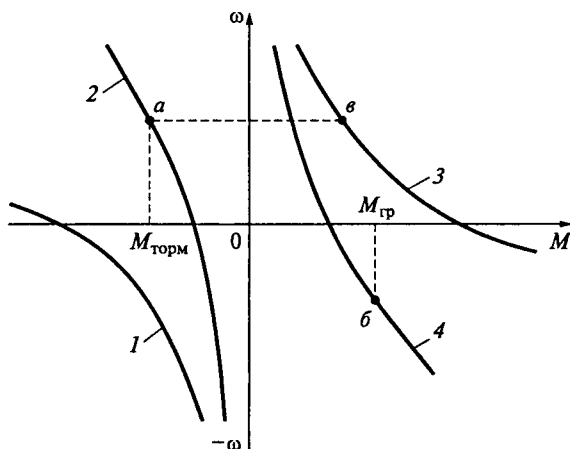


Рис. 5.23. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения в режиме противовключения:

1, 3 — естественные при включении соответственно «Назад» и «Вперед»; 2 — при реверсе с включенным добавочным резистором; 4 — при включении «Вперед» с добавочным резистором

теристики приобретают большую жесткость и пересекают ось ординат. Примерные механические характеристики для этого способа регулирования показаны на рис. 5.22, б. Шунтирование якоря позволяет получить устойчивую пониженную скорость при отсутствии нагрузки на валу двигателя. В данной схеме возможен переход двигателя в режим рекуперативного торможения при $\omega > \omega_{01}$ или $\omega > \omega_{02}$. Существенным недостатком рассматриваемого способа регулирования является его неэкономичность, обусловленная большими потерями энергии в шунтирующем резисторе.

Для двигателей последовательного возбуждения характерны два режима торможения: противовключением и динамический. В режиме противовключения необходимо включение добавочного резистора в цепь якоря двигателя. На рис. 5.23 показаны механические характеристики для двух вариантов режима противовключения. Характеристика 1 получается, если при работе двигателя в направлении «Вперед» (точка б) изменить направление тока в обмотке возбуждения и одновременно ввести в цепь двигателя добавочный резистор. При этом двигатель переходит в режим противовключения в точке а с тормозным моментом $M_{\text{торм}}$, под действием которого будет происходить торможение двигателя.

Режим противовключения наступает также при спуске груза. Привод включается в направлении подъема груза, однако благодаря тому, что в цепь двигателя включен добавочный резистор с большим сопротивлением (которому соответствует характеристика 2), двигатель под действием момента, создаваемого гру-

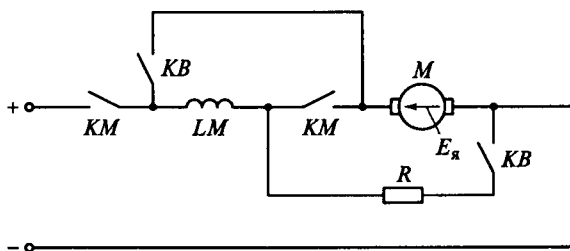


Рис. 5.24. Схема динамического торможения двигателя последовательного возбуждения

зом, вращается в обратном направлении и будет работать в точке б, в которой активный статический момент груза $M_{гр}$ уравновешивается тормозным моментом двигателя, работающего в режиме противовключения. Режим противовключения сопряжен со значительными потерями энергии в цепи двигателя и добавочного резистора.

У режима динамического торможения для двигателей последовательного возбуждения возможны два варианта. В первом варианте якорь двигателя замыкается на резистор, а обмотка возбуждения питается от сети через добавочный резистор. Характеристики двигателя в этом режиме подобны характеристикам двигателя независимого возбуждения в режиме динамического торможения.

Во втором варианте (рис. 5.24) двигатель работает как генератор с самовозбуждением. Особенность данной схемы состоит в том, что при переходе из двигательного режима в режим динамического торможения необходимо сохранить направление тока в обмотке возбуждения во избежание размагничивания машины. При размыкании контактора KM ток в обмотке возбуждения становится

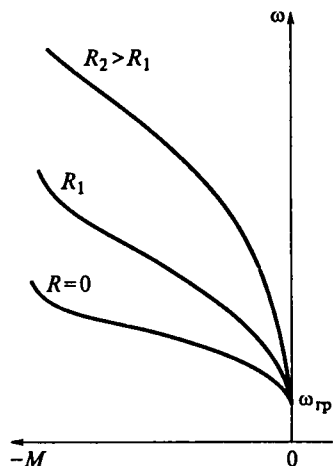


Рис. 5.25. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения в режиме динамического торможения с самовозбуждением

равным нулю, но так как магнитопровод машины был намагничен, то сохраняется остаточный поток возбуждения, благодаря которому в обмотке якоря вращающегося двигателя наводится ЭДС, под действием которой при замыкании контактов KB в цепи обмотка якоря — обмотка возбуждения — резистор R протекает ток и машина самовозбуждается. Этот процесс происходит, если скорость двигателя будет больше граничной скорости $\omega_{гр}$. Механические характеристики в режиме динамического торможения с самовозбуждением показаны на рис. 5.25.

Режим рекуперативного торможения в обычной схеме включения двигателя последовательного возбуждения невозможен. Для его осуществления необходимо шунтирование якоря двигателя либо применение отдельной дополнительной обмотки независимого возбуждения.

5.4. Электроприводы постоянного тока с широтно-импульсным регулированием

Развитие силовой преобразовательной техники, прежде всего силовых транзисторов с изолированным затвором (IGBT-транзисторы), открыло широкие возможности создания регулируемых источников постоянного напряжения (тока), которые находят широкое применение в электроприводах постоянного тока.

Основные достоинства IGBT-транзисторов: высокие параметры силовой цепи (напряжение до 1500 В, ток до 500 А); возможность параллельной работы; малая мощность управления; высокая частота переключений — десятки кГц; модульная конструкция, объединяющая транзистор, быстродействующий обратный диод и элементы цепей управления и защиты. Благодаря им эти приборы позволяют с высокой частотой проводить коммутацию электрических цепей.

Принцип работы привода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения и транзисторным широтно-импульсным регулятором напряжения поясняется схемой на рис. 5.26.

В этой схеме якорная цепь двигателя периодически подключается к источнику питания постоянного тока (неуправляемый выпрямитель UZ), имеющему постоянное напряжение U_n . Включение — отключение напряжения питания осуществляется ключом — транзистором VT . Частота коммутаций f_k цепи постоянная, $f_k = 1/T_k$, где T_k — время коммутации.

Среднее напряжение U_{cp} (рис. 5.27), поступающее на якорь двигателя, определяется отношением времени включенного состояния ключа t_b ко времени периода коммутаций $T_k = t_b + t_0$. Если время включенного состояния $t_b = 0,95 T_k$, то среднее напряжение, поступающее на двигатель, максимально и составляет $U_{max} = 0,95 U_n$.

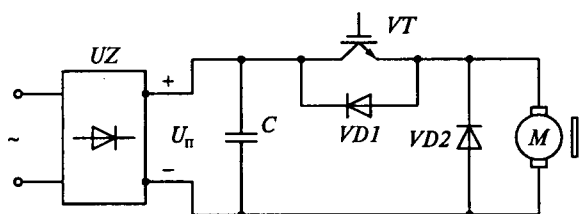


Рис. 5.26. Схема электропривода постоянного тока с широтно-импульсным регулятором напряжения

Если уменьшать время включенного состояния ключа VT (см. рис. 5.26), то среднее значение напряжения будет уменьшаться (оно пропорционально заштрихованной площади, деленной на время T_k).

Из рис. 5.27 следует, что среднее напряжение широтно-импульсного регулятора

$$U = U_n \frac{t_b}{T_k} = \gamma U_n, \quad (5.30)$$

где $\gamma = t_b/T_k$ — скважность импульсов.

При размыкании ключа VT (см. рис. 5.26) ток в якорной цепи двигателя прекратиться мгновенно не может, так как цепь якоря обладает значительной индуктивностью. Поэтому после отключения VT под действием ЭДС самоиндукции обмотки якоря ток будет протекать через шунтирующий диод $VD2$. Диаграммы напряжения и токов при этом процессе представлены на рис. 5.28. Пульсация тока зависит от частоты коммутаций f_k : чем выше частота, тем меньше амплитуда пульсаций. В настоящее время широтно-импульсные регуляторы (ШИР) проектируют с частотой 2 кГц и выше. При

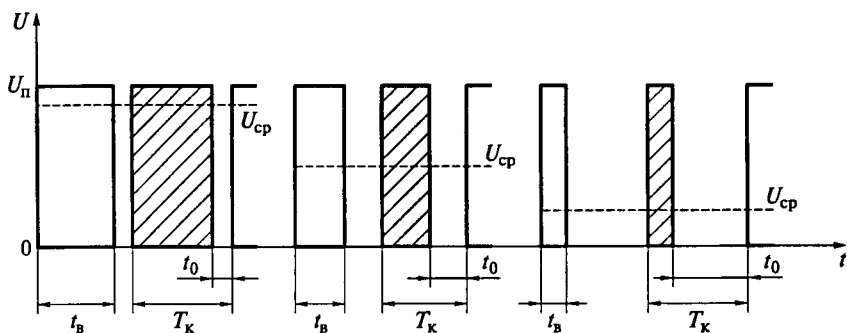


Рис. 5.27. Схема, поясняющая принцип широтно-импульсного регулирования напряжения

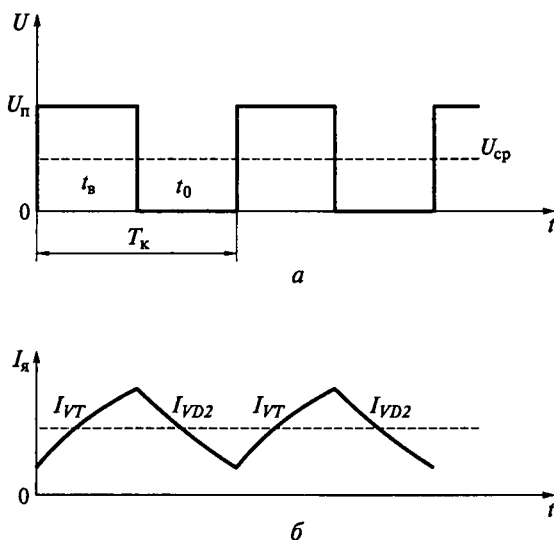


Рис. 5.28. Диаграммы напряжения (а) и токов (б) в широтно-импульсном регуляторе напряжения

высоких частотах амплитуды пульсаций тока будут незначительными и существенно меньше, чем при использовании тиристорных преобразователей с импульсно-фазовым управлением, питающихся от промышленной сети напряжением частотой 50 Гц.

Среднее напряжение, поступающее на якорную цепь двигателя, будет равно $U_d = U_n \gamma$, и, следовательно, механические характеристики электропривода в данной схеме будут описываться выражением (см. (5.5) и (5.30))

$$\omega = \frac{U_n \gamma}{k\Phi} - \frac{R_{я.ц} M}{(k\Phi)^2},$$

где $R_{я.ц}$ — сопротивление якорной цепи.

Заметим, что скважность импульсов $\gamma = 0 \dots 0,95$. Значение U_n зависит от схемы выпрямления. При достаточно мощном фильтровом конденсаторе она приближается к амплитудному значению линейного напряжения переменного тока.

Механические характеристики неререверсивного привода постоянного тока независимого возбуждения с ШИР напряжения аналогичны характеристикам на рис. 5.13, но зона прерывистых токов гораздо меньше.

Важным достоинством схем с широтно-импульсным регулированием напряжения является то, что на входе преобразователя устанавливается неуправляемый выпрямитель, вследствие чего его

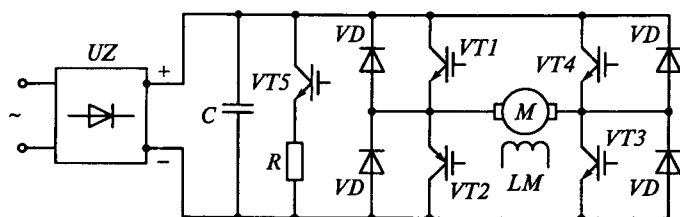


Рис. 5.29. Схема реверсивного электропривода постоянного тока с широтно-импульсным регулятором напряжения

$\cos \varphi_1$ (по первой гармонике) близок к единице, а коэффициент мощности будет не ниже 0,95.

Для реализации реверсивного привода с ШИР напряжения используется мостовая схема включения силовых транзисторных ключей (рис. 5.29). В этой схеме якорь двигателя включен в диагональ моста транзисторных ключей $VT1... VT4$. Протекание тока в одном направлении происходит через транзисторные ключи $VT1... VT3$, в другом — через транзисторные ключи $VT2... VT4$. Для обеспечения непрерывности тока служат обратные диоды VD .

Широтно-импульсное регулирование напряжения может в данной схеме проводиться двумя способами: первый аналогичен способу для нереверсивных схем (см. рис. 5.27), второй предусматривает двухполярную коммутацию за время каждого периода заданной тактовой частоты (рис. 5.30). В последнем случае в течение времени t_b включены транзисторные ключи $VT1$ и $VT3$ (см. рис. 5.29), а в течение времени $(T_k - t_b)$ включены транзисторные ключи $VT2$ и $VT4$.

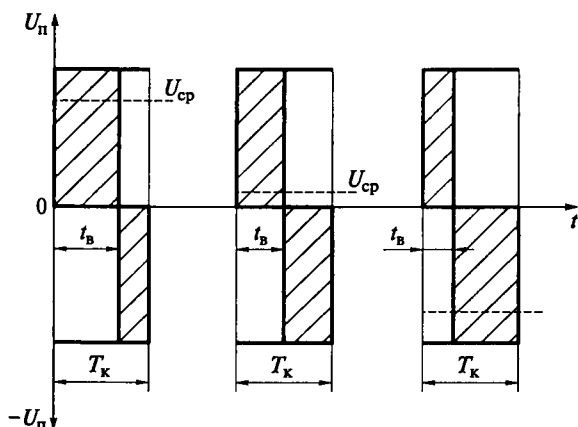


Рис. 5.30. Диаграмма напряжений ШИР при двухполярной коммутации

Среднее напряжение $U_{\text{ср}}$ на нагрузке (якорной цепи двигателя) будет пропорционально разности заштрихованных площадей. Когда $t_{\text{в}} > 0,5T_{\text{к}}$, среднее напряжение положительно; когда $t_{\text{в}} = 0,5T_{\text{к}}$, оно равно нулю; когда $t_{\text{в}} < 0,5T_{\text{к}}$, среднее напряжение отрицательно.

При двухполярной коммутации среднее напряжение

$$U_{\text{ср}} = U_{\text{п}}(2\gamma - 1),$$

где γ — отношение времени включенного состояния транзисторных ключей $VT1... VT3$ к периоду, $\gamma = t_{\text{в}}/T_{\text{в}}$.

Применяется также комбинированный алгоритм коммутации: когда при $U_{\text{ср}} < 0,5U_{\text{п}}$ проводится двухполярная коммутация, а при $U_{\text{ср}} > 0,5U_{\text{п}}$ — однополярная; когда на части периода $T_{\text{к}}$ открыты транзисторные ключи $VT2... VT4$ или все транзисторные ключи закрыты.

Торможение в реверсивном электроприводе постоянного тока с ШИР (см. рис. 5.29) происходит следующим образом. Если в двигательном режиме для выбранного направления вращения работали транзисторные ключи $VT1$ и $VT3$, то в режиме торможения эти ключи будут закрыты и открываются транзисторные ключи $VT4$ и $VT2$, которые также работают в широтно-импульсном режиме. Ток в цепи якоря двигателя меняет свое направление, совпадая по направлению с ЭДС якоря $E_{\text{я}}$. Значение тока ограничивается на требуемом уровне посредством широтно-импульсного регулирования работы транзисторных ключей $VT4$ и $VT2$. Ток якоря попеременно проходит через эти транзисторные ключи, когда они открыты, и через обратные диоды VD , включенные встречно-параллельно транзисторным ключам $VT1$ и $VT3$ (когда транзисторные ключи $VT4$ и $VT2$ закрыты). В первом случае энергия торможения накапливается в индуктивности обмоток якоря. Во втором случае энергия торможения расходуется на подзаряд конденсатора C , напряжение на котором под действием суммы ЭДС якоря и ЭДС самоиндукции обмоток якоря растет. Благодаря этому источник питания UZ в самом начале процесса торможения оказывается запертым. Когда напряжение на конденсаторе достигнет определенного значения, открывается транзисторный ключ $VT5$ и происходит частичный разряд конденсатора на тормозной резистор R .

В схемах с широтно-импульсными регуляторами и нерегулируемым источником постоянного тока режим торможения с отдачей энергии в сеть невозможен.

Пример 5.1. Рассчитать и построить механические характеристики привода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости в диапазоне 10 : 1 при регулировании напряжения якоря и диапазоне 2 : 1

при регулировании потока возбуждения. Система регулирования ограничивает ток якоря величиной $2,5 I_{я.н}$ ($I_{я.н}$ — номинальный ток якоря).

Технические данные двигателя: мощность 11,0 кВт; номинальное напряжение 220 В; номинальный момент $M_n = 48,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$; номинальная скорость $\omega_n = 225 \text{ с}^{-1}$; номинальный ток якоря $I_{я.н} = 54 \text{ А}$; КПД $\eta = 91,5 \%$; число полюсов $2p_n = 4$; число параллельных ветвей обмотки якоря $2a = 2$; число активных проводников якоря $N = 234$; сопротивление обмотки якоря $R_{я} = 0,046 \text{ Ом}$; сопротивление обмотки дополнительных полюсов $R_{д.п} = 0,019 \text{ Ом}$.

Р е ш е н и е. Конструктивная постоянная двигателя

$$k = \frac{p_n N}{2\pi a} = \frac{2 \cdot 234}{2\pi \cdot 1} = 74,5.$$

Машинная постоянная при постоянном номинальном потоке возбуждения

$$C = k\Phi = \frac{M_n}{\eta I_{я.н}} = \frac{48,7}{0,915 \cdot 54} = 0,98 \text{ (Н} \cdot \text{м)}/\text{А}.$$

Механические характеристики в первой зоне регулирования при скорости от $0,1\omega_n$ до ω_n рассчитываем по формуле

$$\omega = \frac{U_{я}}{C} - \frac{M}{\beta},$$

$$\text{где } \beta = \frac{C^2}{R_{я} + R_{д.п}} = \frac{0,98^2}{0,046 + 0,019} = 14,8 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

В первой зоне регулирования момент двигателя ограничен величиной $I_{\max} = 2,5 I_{я.н} = 135 \text{ А}$. Во второй зоне регулирования напряжение якоря постоянно и равно номинальному $U_{я} = 220 \text{ В}$. Регулирование осуществляется ослаблением потока возбуждения от $\Phi = \Phi_n$ до $\Phi = 0,5\Phi_n$ (Φ_n — номинальный поток). При этом машинная постоянная C изменяется пропорционально изменению потока:

$$C = C_n \frac{\Phi}{\Phi_n},$$

а жесткость

$$\beta = \beta_{\text{ест}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_n} \right)^2,$$

где C_n — машинная постоянная при $\Phi = \Phi_n$; $\beta_{\text{ест}}$ — жесткость естественной характеристики. При регулировании во второй зоне следует иметь в виду, что поскольку ток якоря ограничен величиной $2,5I_n$, то максимальный

момент снижается пропорционально ослаблению поля $M_{\max} = 2,5I_n \frac{\Phi}{\Phi_n}$.

Результаты расчета механических характеристик приведены ниже.

Таблица 5.4. Результаты счета механических характеристик

$U, В$	Φ/Φ_n	$\beta, Н \cdot м \cdot с$	$C, В \cdot с$	$U_{\pi}/C = \omega_0, с^{-1}$	$M, Н \cdot м$	$\omega, с^{-1}$
22	1	14,8	0,98	22,4	48,7	19,1
22	1	14,8	0,98	22,4	121,7	14,2
88	1	14,8	0,98	90,0	48,7	86,1
88	1	14,8	0,98	90,0	121,7	81,8
154	1	14,8	0,98	157,1	48,7	153,8
154	1	14,8	0,98	157,1	121,7	148,9
220	1	14,8	0,98	224	48,7	220,1
220	1	14,8	0,98	224	121,7	215,8
220	0,85	10,7	0,83	265	41,4	261,1
220	0,85	10,7	0,83	265	103,4	255,3
220	0,7	7,2	0,69	319	34,0	314,3
220	0,7	7,2	0,69	319	85,2	307,2
220	0,5	3,7	0,49	449	24,4	442,4
220	0,5	3,7	0,49	449	60,8	434,6

Механические характеристики при двухзонном регулировании представлены на рис. 5.31.

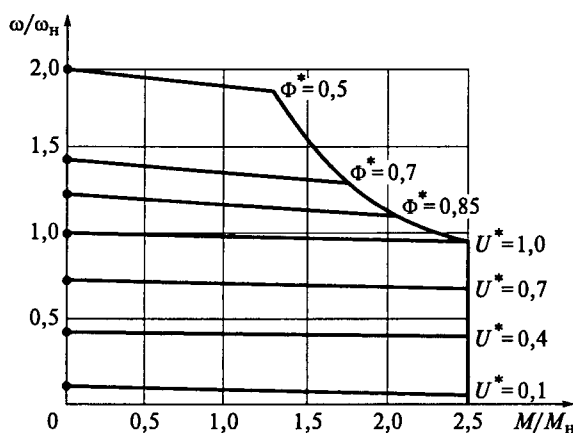


Рис. 5.31. Механические характеристики при двухзонном регулировании скорости

Контрольные вопросы

1. Назовите основные способы регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
2. Как изменится скорость двигателя постоянного тока при уменьшении тока возбуждения, если момент на валу не превышает номинальный?
3. Почему при увеличении скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения выше номинальной ослаблением поля снижаются номинальный и максимальный моменты двигателя?
4. В чем состоит способ двухзонного регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения?
5. Поясните различие в регулировании скорости с постоянным моментом и с постоянной мощностью.
6. Какова должна быть скорость двигателя постоянного тока независимого возбуждения, чтобы он работал в режиме рекуперативного торможения?
7. В каких тормозных режимах может работать двигатель постоянного тока независимого возбуждения?
8. Приведите классификацию управляемых тиристорных выпрямителей, используемых в приводе ТП—Д.
9. Поясните принцип действия управляемого тиристорного выпрямителя.
10. Какова особенность тиристорного преобразователя для реверсивного электропривода по системе ТП—Д?
11. Каково назначение логического переключающего устройства в реверсивном приводе по системе ТП—Д?
12. В чем заключается принцип отдельного управления реверсивным тиристорным преобразователем?
13. Каково должно быть соотношение между углами управления реверсивного тиристорного преобразователя, чтобы механические характеристики привода ТП—Д в двигательном и тормозном режимах были согласованы?
14. Поясните принцип действия силового транзисторного регулятора напряжения.
15. Что такое скважность импульсов?
16. Как зависит коэффициент мощности электропривода по системе ТП—Д от скорости?
17. Как изменить направление вращения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения?
18. Назовите способы регулирования скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, какой из этих способов более экономичный?
19. Почему двигатель постоянного тока последовательного возбуждения не может работать в режиме холостого хода?
20. Что такое инверторный режим работы управляемого тиристорного выпрямителя, каковы условия реализации этого режима?

6.1. Способы регулирования асинхронного двигателя

Асинхронные двигатели являются наиболее часто применяемыми во всех хозяйствах электрическими двигателями. Эти двигатели выпускают мощностью от 0,1 кВт до нескольких тысяч киловатт. Основными достоинствами асинхронного двигателя являются простота конструкции и невысокая стоимость. Однако принцип действия его таков, что в прямой схеме включения не допускается регулирование его скорости.

Особое внимание следует обратить на то, что во избежание значительных потерь энергии, а следовательно, для короткозамкнутых асинхронных двигателей во избежание перегрева его ротора двигатель должен работать в длительном режиме с минимальными значениями скольжения.

Рассмотрим возможные способы регулирования скорости асинхронных двигателей (рис. 6.1). Скорость двигателя определяется



Рис. 6.1. Классификация способов регулирования скорости асинхронных двигателей

двумя величинами (см. (3.4) и (3.5)): скоростью электромагнитного поля статора ω_0 и скольжением s :

$$\begin{aligned}\omega &= \omega_0 - s_{\text{абс}}; \\ \omega &= \omega_0 - \omega_0 s.\end{aligned}\tag{6.1}$$

Исходя из (6.1) принципиально возможны два способа регулирования скорости: регулирование скорости поля статора и регулирование скольжения при постоянной скорости поля статора.

Скорость поля статора определяется двумя величинами (см. (3.1)): частотой напряжения f_1 , подводимого к обмоткам статора, и числом пар полюсов двигателя p_n .

В соответствии с этим возможны два способа регулирования скорости поля статора: изменение частоты напряжения питания посредством преобразователей частоты, включаемых в цепь статора двигателя (частотное регулирование), и путем изменения числа пар полюсов двигателя.

Регулирование скольжения двигателя при постоянной скорости поля статора для короткозамкнутых асинхронных двигателей возможно путем изменения напряжения статора при постоянной частоте этого напряжения. Для асинхронных двигателей с фазным ротором, кроме того, возможны еще два способа: введение в цепь ротора добавочных резисторов (реостатное регулирование) и введение в цепь ротора добавочной регулируемой ЭДС посредством преобразователей частоты, включаемых в цепь ротора (асинхронный вентильный каскад и двигатель двойного питания).

В настоящее время благодаря развитию силовой преобразовательной техники созданы и серийно выпускаются различные виды полупроводниковых преобразователей частоты. Это определило опережающее развитие и широкое применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода. Основные достоинства этого электропривода следующие:

- плавность регулирования и высокая жесткость механических характеристик, что позволяет регулировать скорость в широком диапазоне;
- экономичность регулирования, определяемая тем, что двигатель работает с малыми значениями абсолютного скольжения и потери в двигателе не превышают номинальных.

Недостатками частотного регулирования являются сложность и высокая стоимость (особенно для приводов большой мощности) преобразователей частоты, а также сложность реализации в большинстве схем режима рекуперативного торможения.

Изменение скорости переключением числа пар полюсов асинхронного двигателя позволяет получать от двух до четырех рабочих скоростей, т. е. плавное регулирование скорости и формирование переходных процессов при этом способе невозможно. Поэтому, хотя данный способ имеет определенные области приме-

нения, он не может рассматриваться как основа для построения систем регулируемого электропривода.

Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением питающего напряжения при постоянной (стандартной) его частоте было рассмотрено в гл. 3. Было отмечено, что этот способ регулирования для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором имеет весьма ограниченное применение вследствие того, что регулирование скорости здесь сопряжено с потерями энергии скольжения в роторе двигателя, ведущими к его перегреву. Получаемые при этом способе механические характеристики неблагоприятны для качественного регулирования. Диапазон регулирования не превышает $1,5 : 1$; больший диапазон регулирования скорости можно допускать только кратковременно. Исходя из этого регулирование изменением напряжения питания применяется главным образом только для обеспечения плавного пуска нерегулируемых асинхронных электроприводов или для кратковременного снижения скорости. Иногда этот способ регулирования используется для регулирования скорости насосов и вентиляторов (механизмов с вентиляторным характером нагрузки) небольшой мощности (до 15 кВт), однако и в этом случае необходимо увеличение установленной мощности двигателя.

Для асинхронных двигателей с фазным ротором регулирование скорости может проводиться воздействием на роторную цепь двигателя. При введении добавочных резисторов в цепь ротора энергия скольжения рассеивается не в объеме двигателя, а в резисторах. Этот способ регулирования неэкономичен, так как значительная часть энергии расходуется в добавочных резисторах. При использовании релейно-контакторных схем исключается плавность регулирования скорости. В настоящее время управление с введением добавочных резисторов в цепь ротора используется в основном для пуска асинхронных двигателей с фазным ротором.

Все способы регулирования, основанные на изменении скольжения асинхронного двигателя, связаны с выделением энергии скольжения в роторной цепи двигателя. В рассматриваемых выше способах эта энергия расходовалась на нагрев обмотки ротора и роторных резисторов. Существуют системы регулируемого электропривода, в которых энергия скольжения не теряется в резисторах, а используется полезно: возвращается в питающую сеть, что делает регулирование в этих системах экономичным. К таким системам регулируемого привода относятся асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. Особенностью каскадных схем асинхронного привода является ограниченный диапазон регулирования — не больше чем $2 : 1$. В этом диапазоне каскадные схемы обеспечивают плавное и экономичное регулирование скорости. Такие системы электропривода наиболее целесообразны для мощных турбомеханизмов — насосов и вентиляторов.

6.2. Асинхронные электроприводы с частотным регулированием скорости

Частотное регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения частоты напряжения питания возможно благодаря тому, что скорость электромагнитного поля статора пропорциональна частоте напряжения питания:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p_n}. \quad (6.2)$$

Следует также учесть, что поскольку с изменением частоты напряжения питания изменяется и поток двигателя Φ_1 :

$$\Phi_1 = \frac{E_1}{kf_1} \approx \frac{U_1}{kf_1}, \quad (6.3)$$

то в большинстве случаев одновременно с изменением частоты напряжения питания необходимо регулировать и его амплитуду. Регулирование напряжения при уменьшении частоты ниже номинальной частоты необходимо потому, что из-за уменьшения индуктивного сопротивления обмоток двигателя ток намагничивания будет возрастать, что приведет к насыщению магнитопровода двигателя и его перегреву. Регулирование напряжения следует проводить таким образом, чтобы скольжение двигателя было минимальным.

Для реализации способа частотного регулирования асинхронный короткозамкнутый двигатель включают в сеть (рис. 6.2) с параметрами $U_c = \text{const}$ и $f_c = \text{const}$ через преобразователь частоты UZ . В качестве преобразователей частоты в настоящее время используют в основном полупроводниковые преобразователи частоты.

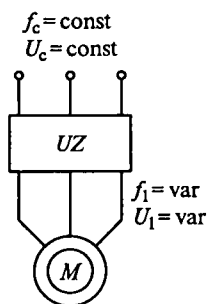


Рис. 6.2. Схема включения асинхронного двигателя с питанием от преобразователя частоты

При частотном регулировании относительное скольжение s_j зависит как от абсолютного скольжения $s_{абс} = \omega_0 - \omega$, так и от относительной частоты f_{1*} напряжения питания:

$$\frac{f_{1j}}{f_{1н}} = f_{1*}; \quad (6.4)$$

$$s_j = \frac{\omega_{0j} - \omega}{\omega_{0j}}, \quad (6.5)$$

где f_{1j} , ω_{0j} , s_j — регулируемые частота напряжения статора и соответствующие скорость поля и скольжение; $f_{1н}$ и $\omega_{0н}$ — номинальные значения частоты статора и скорости поля, соответствующие паспортным данным двигателя.

Подставив (6.2) в (6.5), получим

$$s_j = 1 - \frac{\omega}{\omega_{0н} f_{1*}}. \quad (6.6)$$

Для анализа электромеханических характеристик двигателя при частотном регулировании рассмотрим Т-образную схему замещения двигателя (рис. 6.3). В отличие от ранее приведенной схемы замещения (см. рис. 3.4) в данном случае приходится учитывать, что реактивные сопротивления двигателя x_{1j} , $x_{\mu j}$, x'_{2j} , x_k зависят от частоты напряжения питания и изменяются с изменением частоты:

$$\begin{aligned} x_{1j} &= x_{1н} f_{1*}; & x_{\mu j} &= x_{\mu н} f_{1*}; \\ x'_{2j} &= x'_{2н} f_{1*}; & x_k &= x_{к.н} f_{1*}, \end{aligned} \quad (6.7)$$

где $x_{1н}$, $x_{\mu н}$, $x'_{2н}$, $x_{к.н}$ — номинальное индуктивное сопротивление соответственно обмотки статора, контура намагничивания и короткого замыкания.

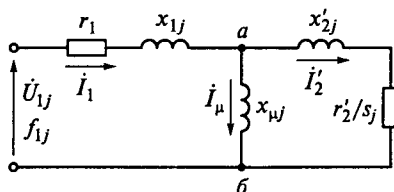


Рис. 6.3. Схема замещения асинхронного двигателя:

$\dot{U}_{1j}$, f_{1j} — регулируемые соответственно напряжение и частота статора; $\dot{I}_{\mu}$ — ток намагничивания; $\dot{I}'_2$, r'_2 — приведенные соответственно ток и сопротивление ротора; x_{μ} — индуктивное сопротивление контура намагничивания

Нужно заметить, что при номинальной частоте 50 Гц индуктивное сопротивление контура намагничивания $x_{\mu n}$ на порядок (для машин малой мощности) или на два порядка (для машин большой мощности) больше, чем активное сопротивление обмотки статора r_1 . Поэтому при анализе и расчете электро механических характеристик асинхронных двигателей, работающих при постоянной номинальной частоте напряжения питания, сопротивлением r_1 обычно пренебрегают. Если же двигатель работает с переменной частотой напряжения, то при снижении частоты сопротивление r_1 становится соизмеримым с реактивными сопротивлениями машины и необходимо учитывать сопротивление r_1 .

Мощность скольжения в цепи ротора расходуется на нагрев обмоток ротора:

$$P_s = M \omega_0 s_j = 3 I_2'^2 r_2',$$

откуда

$$M = \frac{3 I_2'^2 r_2'}{\omega_0 s_j}. \quad (6.8)$$

Из рис. 6.3, учитывая, что отношения $x_{1n}/x_{\mu n} \ll 1$ и $x_{2n}/x_{\mu n} \ll 1$ и ими можно пренебречь, определим:

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\sqrt{x_{к.н}^2 f_{1*}^2 + \left(r_1 + \frac{r_2'}{s_j}\right)^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s_j x_{\mu n} f_{1*}}\right)^2}}. \quad (6.9)$$

Подставив (6.9) в (6.8), получим формулу для расчета механических характеристик при переменных значении и частоте напряжения питания:

$$M = \frac{3 U_{1j}^2 r_2'}{\omega_0 s_j \left[x_{к.н}^2 f_{1*}^2 + \left(r_1 + \frac{r_2'}{s_j}\right)^2 + \frac{r_1 r_2'}{s_j x_{\mu n} f_{1*}} \right]}. \quad (6.10)$$

Если считать $r_1/x_{\mu n} = 0$ и $f_{1*} = 1$, то формула (6.10) станет идентичной формуле для расчета механических характеристик нерегулируемого по частоте асинхронного двигателя (см. (3.19)).

Полагая $dM/ds_j = 0$, найдем максимальный момент и критическое скольжение:

$$M_k = \frac{3U_{1j}^2}{2\omega_{0j} \left[r_1 \pm \sqrt{(r_1^2 + x_{к.н}^2 f_{1*}^2) \left(1 + \frac{r_1^2}{x_{\mu н}^2 f_{1*}^2} \right)} \right]}; \quad (6.11)$$

$$s_{kj} = \pm r_2' \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{r_1}{x_{\mu н} f_{1*}} \right)^2}{r_1^2 + x_{к.н}^2 f_{1*}^2}}. \quad (6.12)$$

Знак «+» соответствует двигательному режиму, знак «-» — режиму рекуперативного торможения.

Из формулы (6.11) следует, что если пренебречь активным сопротивлением статора ($r_1 = 0$), то, для того чтобы при частотном регулировании (уменьшении частоты ниже номинальной частоты) сохранять критический момент постоянным, нужно напряжение изменять пропорционально изменению частоты:

$$\frac{U_{1*}}{f_{1*}} = \text{const}, \quad (6.13)$$

где $U_{1*} = \frac{U_{1j}}{U_{1н}}$.

Механические характеристики, соответствующие частотному регулированию при условии (6.13) и $r_1 = 0$, показаны на рис. 6.4 (сплошные линии). В первом приближении пропорциональное регулирование напряжения в соответствии с условием (6.13) обеспечивает работу двигателя с постоянным потоком.

В действительности при малых значениях частоты ($f_{1*} < 0,3$) падение напряжения на сопротивлении r_1 (см. рис. 6.3) существенно снижает напряжение, прикладываемое к контуру намагничивания (напряжение $U_{аб}$ на рис. 6.3):

$$\dot{U}_{аб} = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 r_1.$$

Падение напряжения на индуктивном сопротивлении x_1 уменьшается с уменьшением частоты и поэтому не оказывает такого влияния на напряжение $\dot{U}_{аб}$, как падение напряжения на активном сопротивлении r_1 , которое не зависит от частоты.

При более точном расчете с учетом падения напряжения на сопротивлении r_1 получаются механические характеристики, показанные на рис. 6.4 штриховой линией. При малых частотах, когда относительное падение напряжения на сопротивлении r_1 ста-

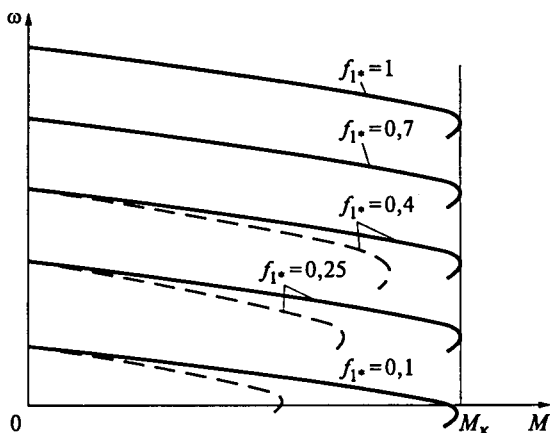


Рис. 6.4. Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании при $U_{1*}/f_{1*} = \text{const}$

новится значимым, поток двигателя уменьшается и соответственно уменьшается максимальный момент M_k (см. (6.11)). Поэтому, для того чтобы регулировать скорость двигателя, сохраняя максимальный момент двигателя постоянным, нужно напряжение уменьшать в меньшей степени, чем частоту:

$$U_1 \approx U_{1n} f_{1*} + I_{1n} r_1 (1 - f_{1*}). \quad (6.14)$$

Такой способ регулирования напряжения называют пропорциональным регулированием с I_r -компенсацией. Зависимость напряжения питания от частоты показана на рис. 6.5. При регулировании напряжения в соответствии с соотношением (6.14) механические характеристики имеют вид, показанный на рис. 6.4 сплошными линиями.

Следует иметь в виду, что величина I_r зависит от r_1 , которая для двигателей мощностью более 100 кВт незначительна, и ею,

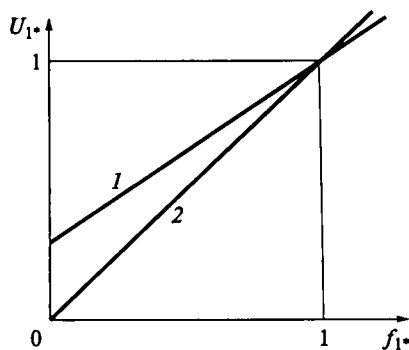


Рис. 6.5. Зависимость напряжения питания от частоты:

1 — $U_1 = U_{1n} f_{1*} + I_{1n} r_1 (1 - f_{1*})$; 2 — U_{1*}/f_{1*} .

как правило, можно пренебрегать; для двигателей мощностью до 15 кВт учет r_1 обязателен.

В ряде случаев, в частности при вентиляторном характере нагрузки, нет необходимости при снижении скорости поддерживать критический момент двигателя равным номинальному. В этом случае более целесообразно выдерживать постоянным соотношение между статическим и максимальным моментами двигателя: $M_c/M_k = \text{const}$, пользуясь следующим соотношением между частотой и напряжением (формула М. П. Костенко):

$$U_{1*} = f_{1*} \sqrt{M_{c*}}, \quad (6.15)$$

где M_{c*} — относительный статический момент при данной частоте (скорости), $M_{c*} = M_c/M_n$.

Так, для привода вентилятора при снижении скорости в 2 раза статический момент снижается в 4 раза. Тогда в соответствии с (6.15) при снижении частоты в 2 раза напряжение можно уменьшить в 4 раза. При этом сокращаются потери в обмотке статора и магнитопроводе машины.

При стандартной частоте питания 50 Гц невозможно получить частоту вращения асинхронного двигателя выше 3000 мин^{-1} . Для достижения более высокой частоты вращения необходимо подавать на асинхронный двигатель напряжение с частотой более 50 Гц. Для многих механизмов — машин текстильной промышленности, шлифовальных станков, центрифуг и др., — необходимы частоты вращения рабочего органа от 6000 мин^{-1} и более. В этом случае применяют преобразователи частоты с выходной частотой более 50 Гц. Однако повышение напряжения выше стандартного, как правило, невозможно или затруднено. В этом случае пользоваться соотношением (6.13) невозможно и регулирование скорости повышением частоты выше номинальной проводится при постоянном напряжении $U_{1*} = 1$.

Очевидно, что в этом случае ток намагничивания I_μ уменьшается с ростом частоты, соответственно падает поток двигателя. Как следует из (6.11), максимальный момент снижается примерно обратно пропорционально квадрату частоты. Однако поскольку ток ротора I'_2 можно путем увеличения скольжения длительно поддерживать равным номинальному, то длительно допустимый номинальный момент уменьшается обратно пропорционально частоте в первой степени. Поскольку с увеличением частоты скорость двигателя увеличивается, то длительно допустимая мощность на валу двигателя остается примерно постоянной. Поэтому регулирование повышением частоты более номинальной при сохранении постоянства напряжения считают регулированием с постоянной мощностью. Механические характеристики для этого случая приведены на рис. 6.6. Регулирование изменением частоты

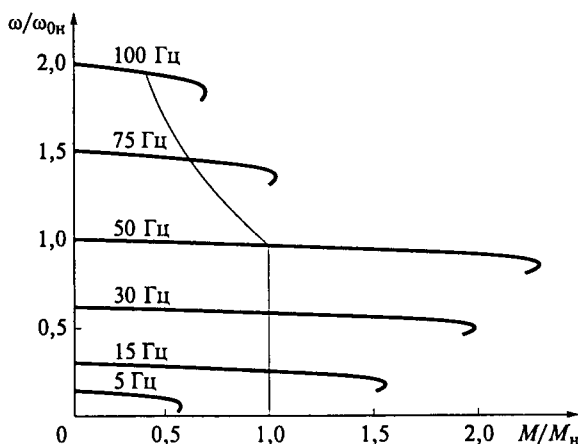


Рис. 6.6. Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании

вниз от номинальной с одновременным регулированием напряжения в соответствии с соотношением (6.14) относят к регулированию с постоянным моментом.

Пример 6.1. Частотно-регулируемый электропривод состоит из асинхронного короткозамкнутого двигателя 4А132М4У3 и преобразователя частоты типа инвертора напряжения.

Технические данные двигателя: $P_n = 11$ кВт; $U_{1n} = 380$ В; $\omega_{0n} = 157$ с⁻¹; $\omega_n = 152$ с⁻¹; $M_k/M_n = 2,2$; $r_1 = 0,43$ Ом; $r'_2 = 0,43$ Ом; $x_k = 1,5$ Ом; $x_\mu = 32$ Ом.

Задача — рассчитать механические характеристики привода при следующих соотношениях частоты и напряжения двигателя:

1. $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$ при $f_1 = 5 \dots 50$ Гц;

2. $U_1 = \text{const}$ при $f_1 = 50 \dots 100$ Гц.

Решение. 1. Номинальный момент двигателя

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{11\,000}{152} = 72 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Номинальное скольжение двигателя

$$s_n = \frac{\omega_{0n} - \omega_n}{\omega_{0n}} = \frac{157 - 152}{157} = 0,03.$$

3. Результаты расчета механических характеристик сведены в табл. 6.1, где величины с нижним индексом * — относительные. За базовые значения при расчете приняты: $f_1 = f_{1n} = 50$ Гц; $\omega_0 = \omega_{0n} = 157$ с⁻¹; $M_n = 72$ Н·м. Расчет выполнялся по формулам: ω_{0j} — по (6.2); s_{kj} — по (6.12); M_k — по (6.11); M — по (6.10).

Таблица 6.1. Результаты расчета механических характеристик асинхронного двигателя при частотном регулировании

Характеристика	f_1^*	$U_{1j},$ В	$\omega_{0j},$ с ⁻¹	s_{kj}	M_{kj}	ω_{0j}^*	s_j^*	ω_j^*	M
Естественная характеристика: 220 В, 50 Гц	1,0	220	157	0,155	2,35	1,0	0,0	1,0	0,0
	1,0	220	157	0,155	2,35	1,0	0,03	0,97	1,0
	1,0	220	157	0,155	2,35	1,0	0,155	0,845	2,35
$U_1/f_1 = \text{const},$ 30 Гц	0,6	132	94,2	0,20	1,98	0,6	0,0	0,6	0,0
	0,6	132	94,2	0,20	1,98	0,6	0,1	0,54	1,56
	0,6	132	94,2	0,20	1,98	0,6	0,2	0,48	1,98
$U_1/f_1 = \text{const},$ 15 Гц	0,3	66	47,1	0,4	1,54	0,3	0,0	0,3	0,0
	0,3	66	47,1	0,4	1,54	0,3	0,2	0,24	1,21
	0,3	66	47,1	0,4	1,54	0,3	0,4	0,18	1,54
$U_1/f_1 = \text{const},$ 5 Гц	0,1	22	15,7	0,6	0,6	0,1	0,0	0,1	0,0
	0,1	22	15,7	0,6	0,6	0,1	0,3	0,07	0,485
	0,1	22	15,7	0,6	0,6	0,1	0,6	0,04	0,6
$U_1 = 220$ В, $f_1 = 75$ Гц	1,5	220	235,5	0,1	1,1	1,5	0,0	1,5	0,0
	1,5	220	235,5	0,1	1,1	1,5	0,05	1,42	0,9
	1,5	220	235,5	0,1	1,1	1,5	0,1	1,35	1,1
$U_1 = 220$ В, $f_1 = 100$ Гц	2,0	220	314	0,08	0,72	2,0	0,0	2,0	0,0
	2,0	220	314	0,08	0,72	2,0	0,04	1,9	0,55
	2,0	220	314	0,08	0,72	2,0	0,08	1,85	0,72

Как видно из полученных характеристик (см. рис. 6.6), при снижении частоты с одновременным снижением напряжения так, чтобы $U_1/f_1 = \text{const}$, критический момент при низких частотах напряжения питания существенно снижается, что связано с падением напряжения на активном сопротивлении r_1 . Для того чтобы критический момент остался постоянным, напряжение нужно снижать в меньшей степени, чем частоту, компенсируя падение напряжения на активном сопротивлении статора, т.е. следует пользоваться соотношением (6.14). При повышении частоты более номинальной и сохранении напряжения равным номинальному скорость двигателя возрастает, но максимальный момент уменьшается.

6.3. Электроприводы по системе «преобразователь частоты с непосредственной связью — асинхронный двигатель»

Вентильные (полупроводниковые) преобразователи частоты можно разделить на две группы:

1) преобразователи с непосредственной связью питающей сети и нагрузки (НПЧ);

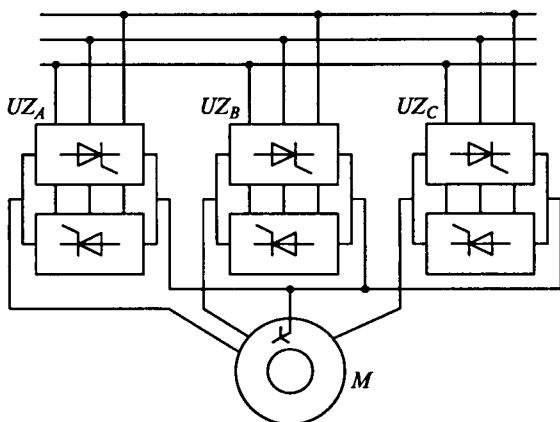


Рис. 6.7. Схема преобразователя частоты с непосредственной связью

2) преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока.

Преобразователь частоты с непосредственной связью включается в статорную цепь асинхронного двигателя и служит для преобразования напряжения стандартной частоты в напряжение, регулируемое в определенных пределах по значению и частоте.

Преобразователи частоты с непосредственной связью обычно представляют собой три согласованно работающих реверсивных тиристорных преобразователя постоянного тока. Схема преобразователя частоты с непосредственной связью представлена на рис. 6.7.

Каждая фаза асинхронного двигателя питается от своего реверсивного преобразователя. Напряжение, прикладываемое к обмотке фазы статора (см. (5.14), (5.15)),

$$U_{\phi} = k_{cx} U_{л} \cos \alpha,$$

где k_{cx} — коэффициент схемы; $U_{л}$ — линейное напряжение сети питания.

Если угол управления α ($\alpha_{в}$, $\alpha_{п}$) устанавливать в соответствии с текущим значением частоты, например

$$\cos \alpha_{в} = \frac{U_{1н} f_{1*}}{\sqrt{2} k_{cx} U_{л}},$$

и поддерживать неизменным в течение одного полупериода выходной частоты преобразователя, а в течение второй полуволны переключать группы вентилях преобразователя с углом управления $\alpha_{н} = \alpha_{в}$, то получится переменное напряжение прямоуголь-

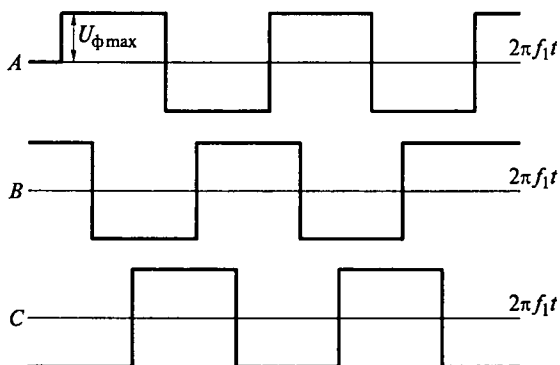


Рис. 6.8. Эпюры напряжений преобразователя частоты с непосредственной связью при прямоугольной форме напряжения

ной формы заданной частоты. Если фазы выходных напряжений преобразователей, питающих фазы B и C (рис. 6.8) двигателя, сдвинуть соответственно на $2/3\pi$ и $4/3\pi$, получим трехфазную систему напряжений прямоугольной формы заданной частоты и соответствующей ей амплитуды напряжения.

Если α_B и α_C в течение каждого полупериода заданной частоты регулировать по арккосинусоидальному закону

$$\alpha_B = \alpha_C = A \arccos(2\pi f_1 t),$$

где $A = \frac{U_{1n} f_1}{k_{cx} U_{\phi}}$, то средние фазные напряжения (U_A , U_B , U_C) будут иметь синусоидальную форму:

$$U_A = A \sin(2\pi f_1 t); \quad U_B = A \sin\left(2\pi f_1 t + \frac{2\pi}{3}\right); \quad U_C = A \sin\left(2\pi f_1 t + \frac{4\pi}{3}\right).$$

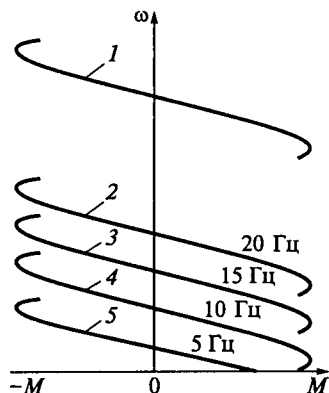
Для получения приемлемой формы выходного напряжения частота напряжения питания сети должна быть в несколько раз выше частоты выходного напряжения.

Преобразователи частоты с непосредственной связью по схеме рис. 6.7 дают возможность при частоте питания 50 Гц получать выходную частоту 0...20 Гц. Поэтому асинхронные электроприводы данного типа чаще всего применяют для тихоходных безредукторных электроприводов средней и большой мощностей.

Основным достоинством преобразователей частоты с непосредственной связью является естественная коммутация вентилей под действием напряжения питания сети, как в управляемых тиристорных преобразователях (выпрямителях), используемых в при-

Рис. 6.9. Механические характеристики электропривода НПЧ-АД:

1 — естественная; 2...5 — при частотном регулировании



воде постоянного тока. Благодаря возможности перевода преобразователя из выпрямительного в инверторный режим в рассматриваемых схемах возможно торможение асинхронного двигателя с отдачей энергии торможения в сеть (рекуперативное торможение).

Механические характеристики асинхронного электропривода с преобразователем частоты с непосредственной связью показаны на рис. 6.9.

6.4. Электроприводы по системе «преобразователь частоты типа автономного инвертора — асинхронный двигатель»

В этой системе используют преобразователи частоты с промежуточной цепью постоянного тока (рис. 6.10).

Переменное напряжение промышленной сети сначала выпрямляется посредством регулируемого или нерегулируемого выпрямителя $UZ1$, а затем подается на автономный инвертор, преобразующий постоянное напряжение U_d (или ток) в напряжение (или ток) регулируемой частоты и значения.

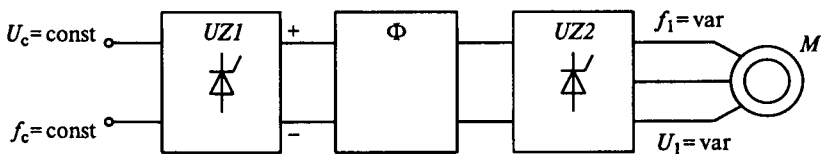


Рис. 6.10. Схема электропривода с преобразователем частоты с промежуточной цепью постоянного тока

Регулирование напряжения (или тока) промежуточного звена постоянного тока может проводиться управляемым выпрямителем $UZ1$, либо (в инверторах напряжения) в качестве первого звена используется неуправляемый выпрямитель, а регулирование напряжения осуществляется инвертором $UZ2$ методом широтно-импульсной модуляции. В первом случае функции управления четко разделены: выпрямитель управляет значением тока или напряжения, а инвертор — значением выходной частоты преобразователя. Во втором случае обе этих функции выполняет инвертор.

Важным узлом преобразователей с промежуточным звеном постоянного тока является фильтр F . Этот фильтр выполняет две функции: сглаживает пульсации выпрямленного напряжения (или тока), а также осуществляет накопление и отдачу энергии, что необходимо для обеспечения циркуляции реактивной мощности между обмотками асинхронного двигателя и фильтром. Поскольку на входе преобразователя установлен полупроводниковый выпрямитель, то циркуляция реактивной мощности между асинхронным двигателем и сетью невозможна.

Преобразователи частоты типа автономного инвертора, используемые в электроприводах, позволяют получать выходную частоту от долей герца до нескольких сотен герц. Верхний предел ограничивается возможной частотой коммутации вентиля инвертора, нижний — степенью искажения формы выходного напряжения или тока; при несинусоидальной форме тока в обмотках двигателя при малых частотах нарушается равномерность вращения ротора.

При частотно-токовом управлении асинхронным двигателем применяются автономные инверторы тока (рис. 6.11). Отличительной особенностью этих инверторов является наличие мощного дросселя (индуктивного фильтра L) в цепи постоянного тока и отсутствие обратных диодов в мостовой схеме инвертора. Для коммутации тиристоров используются коммутирующие конденсаторы C . Переключение тиристоров $VS1... VS6$ осуществляется в порядке возрастания их номеров. Принцип коммутации следующий. Пусть открыты тиристоры $VS1$ и $VS2$. Ток проходит через фазы двигателя a и c . Конденсатор $C13$ имеет положительный заряд на верхней обкладке. При подаче отпирающего импульса на тиристор $VS3$ он открывается и образуется короткозамкнутый контур $C13—VS1—VS3—C13$, по которому происходит перезаряд конденсатора $C13$. Под действием тока перезаряда тиристор $VS1$ закрывается, и ток далее будет протекать через тиристор $VS3$, фазы b и c двигателя и тиристор $VS2$. Полярность заряда конденсатора $C13$ изменится на обратную. Затем открывается тиристор $VS4$ и ток переходит с фазы c на фазу a (в обратном направлении) и т.д. За период заданной частоты происходит шесть коммутаций тиристоров, в результате чего по обмоткам статора двигателя будет протекать трехфазный переменный ток заданной частоты.

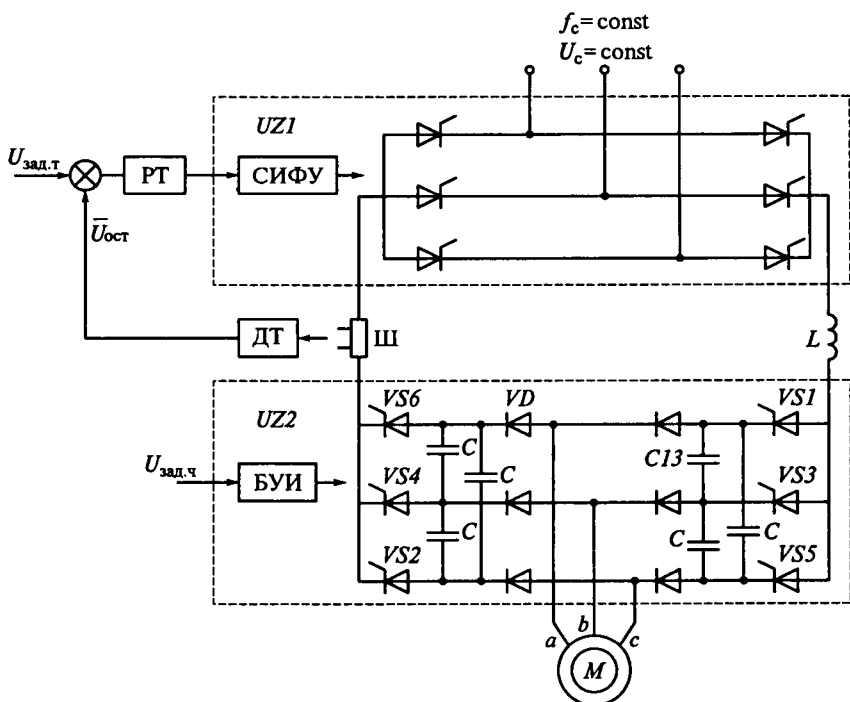


Рис. 6.11. Схема частотного электропривода с автономным инвертором тока:

РТ — регулятор тока; СИФУ — система импульсно-фазового управления; ДТ — датчик тока; Ш — шунт; L — индуктивный фильтр; БУИ — блок управления инвертором; $U_{\text{зад.т}}$, $U_{\text{зад.ч}}$ — напряжение задания соответственно тока и частоты

Значение тока контролируется регулятором тока РТ, в соответствии с выходным сигналом которого изменяется угол управления тиристорами и на выходе выпрямителя $UZ1$ устанавливается необходимое выпрямленное напряжение. Выходная частота преобразователя определяется блоком управления вентилями инвертора (БУИ) в соответствии с заданием частоты.

Достоинствами инвертора тока $UZ2$ являются относительная простота схемы, возможность ее реализации на тиристорах, что позволяет выполнять преобразователи с высокими мощностью и напряжением. В приводах с инвертором тока возможен режим рекуперативного торможения. Для этого, не изменяя направление тока в звене постоянного тока, управляемый выпрямитель переводят в инверторный режим (устанавливают угол $\alpha > \pi/2$).

Недостатками инверторов тока является несинусоидальная форма тока в обмотках статора, а также то, что невозможно питание от одного преобразователя нескольких асинхронных двигате-

лей. Из-за несинусоидальности формы тока при $f_1 < 5$ Гц вращение ротора становится неравномерным, что ограничивает диапазон регулирования скорости электропривода по схеме на рис. 6.11.

В настоящее время большинство преобразователей изготавливают по схеме автономного инвертора напряжения. Это связано с появлением полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов: IGB-транзисторов и запираемых тиристов. Типичная схема электропривода с инвертором напряжения на полностью управляемых приборах дана на рис. 6.12. Схемной особенностью инвертора напряжения является наличие обратных диодов $VD1...VD6$ и фильтрового конденсатора C .

В отличие от инверторов тока, для которых характерным является работа в каждый момент времени по одному вентилю в анодной и катодной группах, в инверторах напряжения более целесообразна одновременная работа двух вентилях в одной группе и одного вентиля в другой группе. При этом продолжительность работы каждого вентиля составляет π . Допустим, что в некоторый момент времени работают транзисторные ключи $VT1$, $VT2$ и $VT6$. Тогда ток протекает по всем трем фазным обмоткам двигателя, причем $2/3$ напряжения U_d прикладывается к фазе a и к двум параллельно включенным фазам b и c (рис. 6.13). При запираании транзисторного ключа $VT6$ (см. рис. 6.12) и включении транзисторного ключа $VT3$ ток в фазе b не может мгновенно измениться и замыкается через диод $VD3$ на конденсатор C , чем обеспечивается циркуляция реактивной мощности между обмотками двигателя и конденсатором C . После включения транзисторного ключа $VT4$ ток будет протекать по параллельно включенным фа-

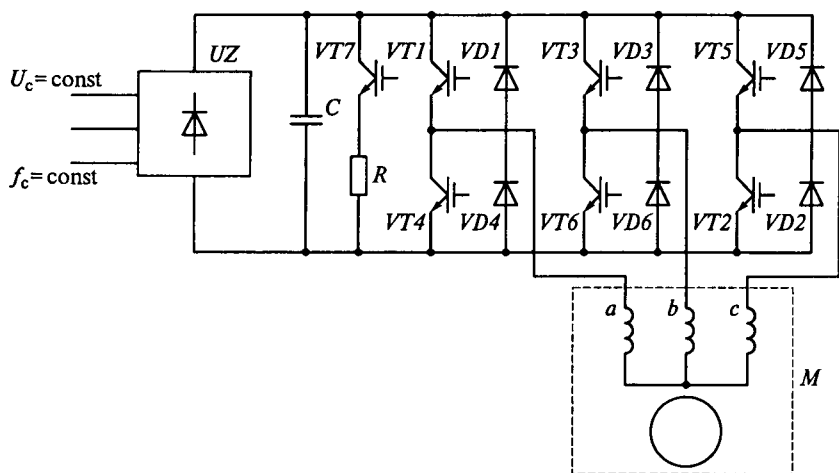


Рис. 6.12. Схема частотного асинхронного электропривода с транзисторным инвертором напряжения

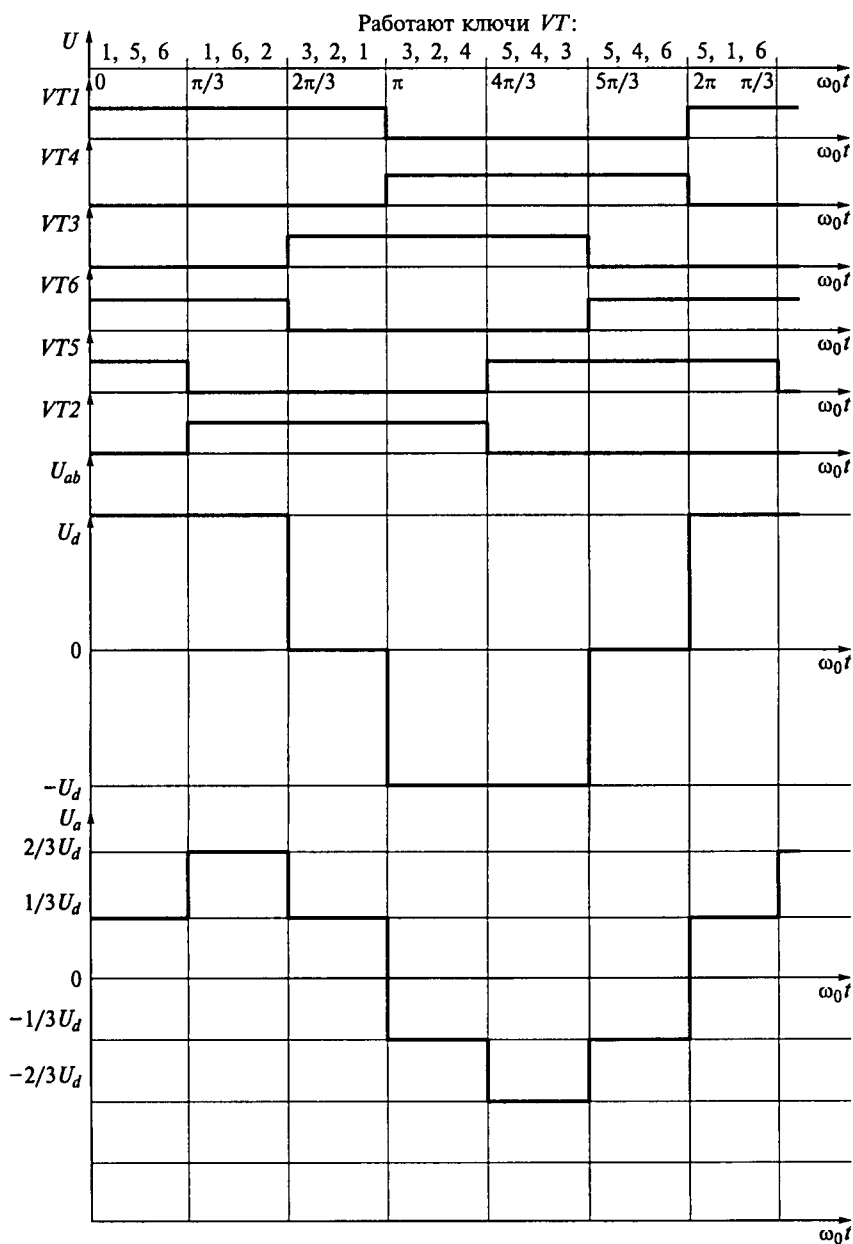


Рис. 6.13. Диаграмма работы ключей $VT1 \dots VT6$ и эпюры линейного и фазного напряжений

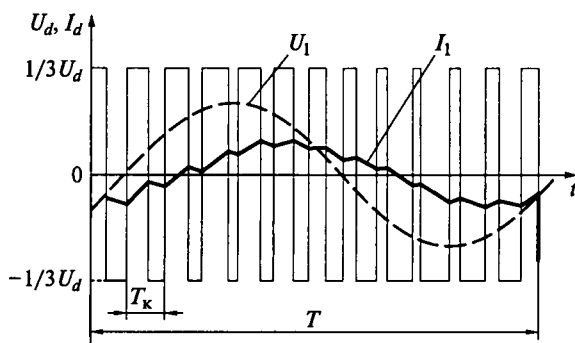


Рис. 6.14. График, поясняющий принцип широтно-импульсной модуляции напряжения и тока фазы автономного инвертора напряжения:

U_1 , I_1 — фазные соответственно напряжение и ток статора; U_d — напряжение питания; T_k — период ШИМ; T — период частоты выходного напряжения

зам a и c и по фазе b и т.д. Линейное $U_{ав}$ и фазное U_a напряжения, прикладываемые к обмоткам двигателя, будут иметь форму, показанную на рис. 6.13.

Требуемая выходная частота определяется частотой переключения вентиля инвертора и задается каналом регулирования частоты. Регулирование выходного напряжения может выполняться двумя способами:

1) посредством управляемого выпрямителя на входе инвертора, с помощью которого регулируется U_d ;

2) использованием способа широтно-импульсного регулирования, осуществляемого вентилями инвертора; в этом случае входной выпрямитель может быть неуправляемым.

Первый способ характеризуется двумя недостатками: ступенчатой формой выходного напряжения (см. рис. 6.13) и низким коэффициентом мощности преобразователя.

Более эффективным является второй способ. При широтно-импульсном способе регулирования (рис. 6.14) возможно не только регулирование среднего напряжения за период, но и коррекция формы выходного напряжения U_1 . Такое регулирование называют широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Она основана на принципе широтно-импульсного регулирования (см. подразд. 5.4).

Так как при двухполярной коммутации выходное напряжение преобразователя

$$U_n = \frac{U_d}{2} (2\gamma - 1),$$

то, регулируя непрерывно скважность γ по синусоидальному закону $\gamma = 1/2 U_1 \cdot (\sin 2\pi f_{jt} + 1)$, можно получить среднее фазное напряжение, также изменяющееся по синусоиде.

Изменяя с помощью системы управления амплитуду U_1 , можно регулировать выходное напряжение преобразователя.

При использовании инверторов напряжения для реализации режима рекуперативного торможения асинхронного двигателя необходимо на входе устанавливать реверсивный преобразователь с двумя группами вентиляей, что усложняет схему преобразователя и снижает ее надежность. Поэтому в инверторах напряжения обычно предусматривают разрядный резистор R (см. рис. 6.12), который подключается в режиме торможения транзисторным ключом $VT7$ и в котором рассеивается энергия торможения.

Существует большое число разновидностей схем преобразователей частоты с автономными инверторами тока и напряжения, которые описаны в соответствующей литературе.

6.5. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания

6.5.1. Асинхронные вентильные каскады

Регулирование скорости асинхронного двигателя в схемах вентильного каскада и двигателя двойного питания осуществляется путем изменения скольжения двигателя при постоянной скорости электромагнитного поля. Статорные обмотки двигателя непосредственно подключаются к питающей сети. Основная особенность этих схем — полезное использование мощности скольжения, трансформируемой в цепь ротора. С этой целью в цепь ротора асинхронного фазного двигателя вводится добавочная ЭДС.

Трудность полезного использования энергии скольжения состоит в том, что ЭДС ротора E_2 и соответственно ток ротора I_2 имеют переменную частоту, зависящую от скольжения (скорости) двигателя (см. подразд. 3.2). В схемах вентильного каскада (рис. 6.15) ток ротора асинхронного двигателя с фазным ротором выпрямляется посредством неуправляемого выпрямителя $UZ1$, и в цепь выпрямленного тока ротора вводят добавочную противоЭДС постоянного тока — ЭДС инвертора $UZ2$. Трансформатор T служит для согласования напряжения сети и напряжения ротора двигателя.

Таким образом, энергия скольжения, индуцируемая в обмотках ротора, преобразуется в энергию постоянного тока и инвертируется (отдается) в питающую сеть. Благодаря такому последовательному преобразованию энергии эти системы называют каскадами. Энергетическая диаграмма, характеризующая преобразование энергии в каскадной схеме, показана на рис. 6.16.

Мощность P_1 , забираемая по цепи статора двигателя из сети, за вычетом потерь в статоре ΔP_1 , преобразуется в мощность вра-

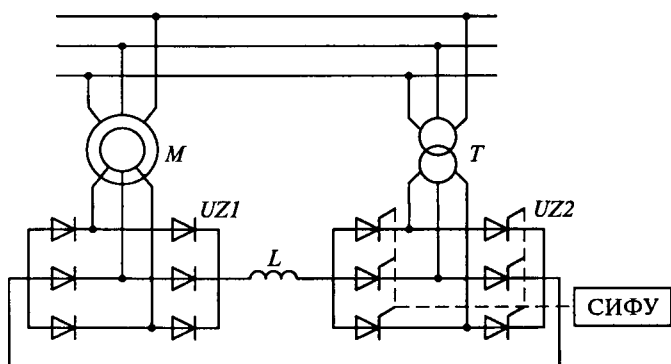


Рис. 6.15. Принципиальная схема асинхронного вентильного каскада

шающего магнитного поля — электромагнитную мощность $P_{эм}$. Последняя делится на две части: механическую $P_{мех}$, реализуемую на валу асинхронного двигателя, и электрическую, трансформируемую в обмотки ротора двигателя — мощность скольжения P_s . Мощность скольжения за вычетом потерь ΔP_2 в роторе двигателя, выпрямителе, инверторе и трансформаторе инвертора возвращается в сеть питания — это мощность рекуперации $P_{рек}$. Таким образом, результирующая, потребляемая приводом из сети мощность $P_{потр} = P_1 - P_{рек}$. Это определяет высокий КПД вентильного каскада.

После выпрямления тока ротора мощность скольжения

$$P_s = (k_{сх} E_{р.н} s - \Delta U_\gamma) I_{др}, \quad (6.16)$$

где $k_{сх}$ — коэффициент мостовой схемы выпрямления, $k_{сх} = 1,35$; $E_{р.н}$ — номинальная (при $s = 1$) линейная ЭДС ротора; $I_{др}$ — вы-

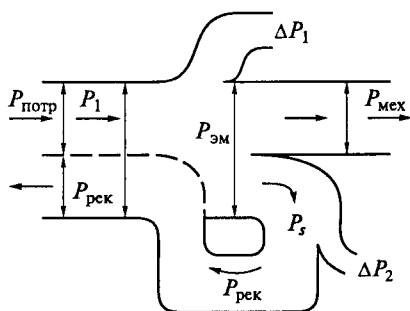


Рис. 6.16. Энергетическая диаграмма асинхронного вентильного каскада

прямленный ток ротора; ΔU_γ — падение напряжения, обусловленное коммутацией вентилей выпрямителя,

$$\Delta U_\gamma = \frac{\kappa_{сх} I_{дp} x_p s}{\sqrt{2}}, \quad (6.17)$$

где x_p — индуктивное сопротивление рассеяния фазы асинхронного двигателя, приведенное к обмотке ротора, $x_p = x_k / k_t^2$; k_t — коэффициент трансформации.

Подставив (6.17) в (6.16), получим

$$P_s = 1,35s \left[E_{p.н} I_{дp} - \frac{I_{дp}^2 x_p}{\sqrt{2}} \right].$$

Момент асинхронного двигателя

$$M = \frac{P_s}{\omega_0 s} = \frac{1,35}{\omega_0} \left(E_{p.н} I_{дp} - \frac{I_{дp}^2 x_p}{\sqrt{2}} \right). \quad (6.18)$$

В первом приближении (при $M \leq M_n$) можно считать, что момент пропорционален выпрямленному току ротора I_d . При больших значениях момента эта пропорциональность нарушается.

Выпрямленный ток ротора определяется разностью выпрямленной ЭДС ротора $E_{дp}$, ЭДС инвертора E_{di} и сопротивлением цепи $R_{экв}$ (рис. 6.17):

$$I_{дp} = \frac{E_{дp} - E_{di}}{R_{экв}}; \quad (6.19)$$

$$I_{дp} = \frac{1,35 E_{p.н} s - 1,35 U_{2т} \cos \beta}{R_{экв}}, \quad (6.20)$$

где $U_{2т}$ — линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора; β — угол управления вентилей инвертора, $\beta = \pi - \alpha$ ($\alpha \geq \pi/2$).

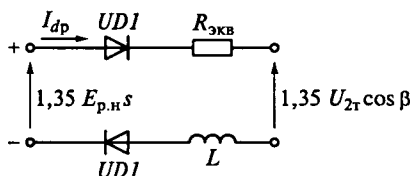


Рис. 6.17. Схема замещения роторной цепи асинхронного вентильного каскада

Сопротивление цепи

$$R_{\text{экв}} = 2r_2 + r_d + 2r_{2\tau} + \frac{3x_{ps}}{\pi} + \frac{3x_{\tau}}{\pi},$$

где r_2 , r_d и $r_{2\tau}$ — активное сопротивление соответственно: обмотки ротора, сглаживающего дросселя и вторичной обмотки трансформатора; $\frac{3x_{ps}}{\pi}$ и $\frac{3x_{\tau}}{\pi}$ — эквивалентные сопротивления, вызванные коммутацией клапанов выпрямителя и инвертора; x_{τ} — сопротивление фазы трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке.

Изменяя угол управления клапанов инвертора β , можно регулировать значение тока ротора $I_{d\phi}$ и, следовательно, момента асинхронного двигателя.

Если $E_{p.n.s} = U_{2\tau} \cos \beta$, то ток ротора и момент будут равны нулю. Скольжение s_0 , соответствующее этому условию, будет скольжением холостого хода двигателя в схеме клапанного каскада

$$s_0 = \frac{U_{2\tau}}{E_{p.n}} \cos \beta = \varepsilon \cos \beta, \quad (6.21)$$

где $\varepsilon = \frac{U_{2\tau}}{E_{p.n}}$.

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

Максимальное скольжение холостого хода определяется максимальным значением противоЭДС инвертора, которое будет при $\beta = \beta_{\min} \approx 15^\circ$:

$$s_{0\max} = \frac{U_{2\tau}}{E_{p.n}} \cos \beta_{\min} = \varepsilon \cos \beta_{\min} = \varepsilon \cos \beta_{\min}. \quad (6.22)$$

Преобразовав уравнение (6.20) с учетом (6.21), получим

$$I_{d\phi} = \frac{1,35E_{p.n}}{R_{\text{экв}}} (s - s_0). \quad (6.23)$$

Решив совместно уравнения (6.18) и (6.23), найдем выражение для расчета механических характеристик клапанного каскада:

$$M = \frac{6E_{p.n}^2}{\pi\omega_0 x_p} \left[\frac{s - s_0}{s + \rho} - \left(\frac{s - s_0}{s + \rho} \right)^2 \right]. \quad (6.24)$$

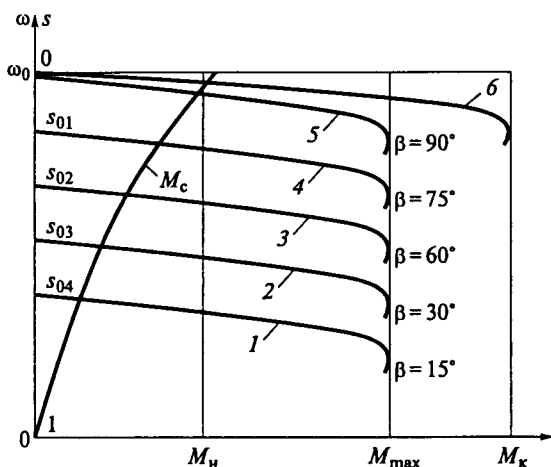


Рис. 6.18. Механические характеристики асинхронного двигателя:
1... 5 — в схеме вентильного каскада; 6 — естественная

Обозначив $\frac{s-s_0}{s+\rho} = A_s$ и $\lambda = \frac{M_k}{M_n}$, где $\rho = \frac{R_{\text{экв}}}{x_p}$; $M_k = \frac{3E_{\text{р.н}}^2}{2\omega_0 x_p}$, по-

лучим

$$M = 3,82\lambda(A_s - A_s^2). \quad (6.25)$$

Механические характеристики вентильного каскада приведены на рис. 6.18.

Механические характеристики имеют высокую жесткость (почти такую же, как у естественной механической характеристики асинхронного двигателя) и перемещаются параллельно друг другу вдоль оси ординат по мере увеличения противоЭДС инвертора E_{di} (уменьшения угла управления β). С помощью уравнений (6.24) и (6.25) можно рассчитать механические характеристики при моменте, не более $0,72 M_k$ (M_k — критический момент асинхронного двигателя). Вследствие того, что ток ротора несинусоидален, критический момент двигателя в схеме каскада не достигается и максимальный момент $M_{\text{max}} = 0,83 M_k$, т.е. перегрузочная способность асинхронного двигателя в схеме каскада снижается на 17 %.

Принцип регулирования скорости в рассматриваемой схеме следующий. Если установить угол управления $\beta = 90^\circ$, то противоЭДС инвертора $E_{di} = 0$. Этому условию соответствует верхняя механическая характеристика. Если при наличии статического момента M_c на валу двигателя уменьшить угол β (например, установить $\beta = 60^\circ$), то противоЭДС инвертора E_{di} станет больше, чем вып-

Ориентировочно требуемая мощность трансформатора инвертора

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

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

В случае регулирования в схеме каскада в неполном диапазоне скорости необходимо осуществить пуск двигателя до нижней рабочей скорости по схеме каскада. Обычно в этом случае используется схема реостатного пуска. Одна из возможных схем показана на рис. 6.19. В этой схеме двигатель разгоняется при включенном контакторе *KM1* и отключенном контакте *KM2* по схеме реостатного пуска с пусковым резистором $R_{\text{пуск}}$. По достижении определенной скорости выше, чем $\omega_0(1 - s_{0\text{max}})$, включается контактор *KM2*, затем отключается *KM1* и двигатель переходит на работу по схеме вентильного каскада.

6.5.2. Двигатели двойного питания

В отличие от схем вентильного каскада, где поток энергии скольжения направлен только в одну сторону — от ротора двигателя к инвертору и далее в сеть питания — в схемах двигателя двойного питания в цепь ротора включают преобразователь (рис. 6.20), обеспечивающий двусторонний обмен энергией: от ротора двигателя в сеть питания и от сети в обмотки ротора асинхронного

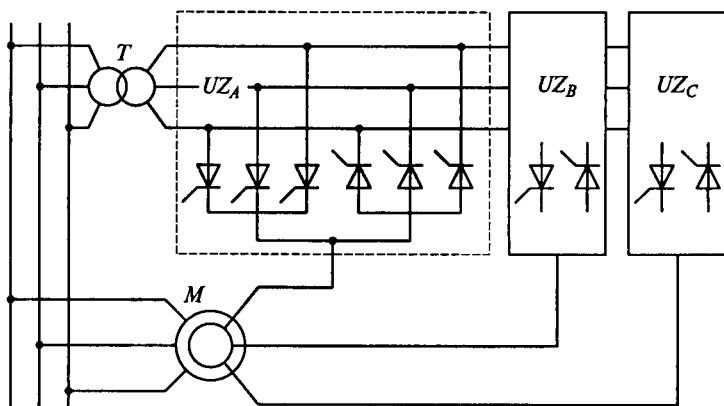


Рис. 6.20. Принципиальная схема двигателя двойного питания

двигателя. Таким преобразователем является преобразователь частоты с непосредственной связью. При этом добавочная ЭДС $U_{\text{доб}}$, вводимая в цепь ротора, может быть направлена навстречу ЭДС ротора согласно с ней или под некоторым углом $(\pi - \delta)$. В общем случае

$$\dot{U}_{\text{доб}} = U_{\text{доб}} e^{j(\pi - \delta)}.$$

Ток ротора определяется из уравнения равновесия напряжений в контуре ротора

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2 + \dot{U}_{\text{доб}}}{Z_2} = \frac{E_{2н} s}{z_2} e^{-j\varphi_2} + \frac{U_{\text{доб}}}{z_2} e^{j(\pi - \delta - \varphi_2)},$$

где z_2 — модуль полного сопротивления обмотки ротора; φ_2 — угол фазы тока ротора.

Соответственно активная и реактивная составляющие тока ротора:

$$\begin{aligned} I_{2a} &= \frac{E_{2н}}{z_2} \left[s \cos \varphi_2 - \frac{U_{\text{доб}}}{E_{2н}} \cos(\delta + \varphi_2) \right]; \\ I_{2p} &= \frac{E_{2н}}{z_2} \left[s \sin \varphi_2 - \frac{U_{\text{доб}}}{E_{2н}} \sin(\delta + \varphi_2) \right], \end{aligned} \quad (6.26)$$

где E_2 , $E_{2н}$ — соответственно текущая и номинальная (при $s = 1$) ЭДС ротора;

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}; \quad \varphi_2 = \arccos \frac{r_2}{z_2},$$

где r_2 , x_2 — соответственно активное и индуктивное сопротивление обмотки ротора.

Активная составляющая тока ротора определяет момент двигателя M и механическую мощность двигателя

$$P_{\text{мех}} = M \omega_0 (1 - s).$$

Реактивная составляющая тока ротора определяет реактивную мощность в статорной и роторной цепях двигателя.

Из формул (6.26) видно, что, регулируя значение и фазу добавочной ЭДС $\dot{U}_{\text{доб}}$ в цепи ротора, можно управлять активной и реактивной мощностями двигателя. Следовательно, при соответствующих значениях $U_{\text{доб}}$ и δ активная составляющая тока ротора может быть отрицательна при $s > 0$ и положительна при $s < 0$. Это означает, что в системе двойного питания асинхронный двига-

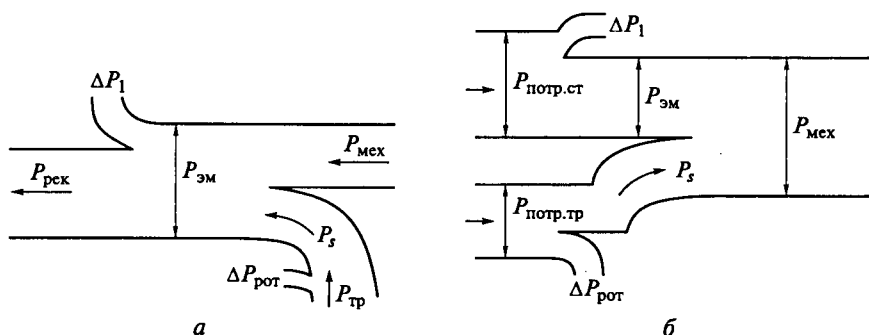


Рис. 6.21. Энергетические диаграммы двигателя двойного питания:

а — в режиме генераторного торможения при скорости ниже синхронной; *б* — в двигательном режиме при скорости выше синхронной

тель может работать в режимах несвойственных ему в обычных схемах включения: генераторного торможения при скорости ниже синхронной (рис. 6.21, *а*) и двигательном при скорости выше синхронной (рис. 6.21, *б*).

Направление потока энергии в режиме генераторного торможения при скорости ниже синхронной противоположно тому, какое было в двигательном режиме (см. рис. 6.16).

Механическая мощность торможения $P_{\text{мех}}$ в рассматриваемом случае недостаточна для создания электромагнитной мощности $P_{\text{эм}}$, поэтому из сети через трансформатор и преобразователь поступает в ротор двигателя недостающая мощность, пропорциональная скольжению: $P_s = M\omega_s$. Сумма механической мощности $P_{\text{мех}}$, поступающей с вала, и мощности скольжения P_s составляет электромагнитную мощность:

$$P_{\text{мех}} + P_s = M\omega = P_{\text{эм}},$$

которая рекупируется в сеть питания. Отдаваемая в сеть мощность равна разности рекупируемой мощности $P_{\text{рек}}$, отдаваемой по цепи статора, и мощности $P_{\text{тр}}$, забираемой со стороны трансформатора:

$$P_{\text{отд}} = P_{\text{рек}} - P_{\text{тр}}.$$

В двигательном режиме при скорости выше синхронной (см. рис. 6.21, *б*) в роторную цепь двигателя добавляется мощность скольжения, забираемая из сети со стороны трансформатора. Она складывается с электромагнитной мощностью, поступающей в двигатель со стороны статора. Сумма этих мощностей преобразуется в механическую мощность на валу двигателя, и двигатель развивает момент M при скорости выше синхронной:

$$P_{\text{потр.ст}} + P_{\text{потр.тр}} - (\Delta P_1 + \Delta P_{\text{рот}}) = M \omega_0 (1 + |s|) = P_{\text{мех}},$$

где $P_{\text{потр.ст}}$, $P_{\text{потр.тр}}$ — мощность, потребляемая приводом со стороны соответственно статора и трансформатора; $\Delta P_{\text{рот}}$ — потери в роторной цепи.

В обоих рассматриваемых режимах преобразователь частоты работает таким образом, что энергия от трансформатора поступает в ротор двигателя, т.е. двигатель питается со стороны как статора, так и ротора.

Поскольку частота f_2 ЭДС и частота f_1 тока ротора определяются скольжением двигателя ($f_2 = f_1 s$), то и частота добавочной ЭДС $U_{\text{доб}}$ в цепи ротора должна совпадать с частотой ЭДС ротора и изменяться при изменении скольжения двигателя.

Максимально возможный диапазон регулирования скорости (ниже и выше от синхронной скорости) определяется двумя параметрами: возможными максимальными значениями частоты f_2 и напряжения $U_{\text{доб max}}$ на выходе преобразователя частоты, служащего для питания цепи ротора. Максимальный диапазон регулирования скорости

$$D = \frac{\omega_{\text{max}}}{\omega_{\text{min}}} = \frac{1 + s_{0 \text{ max}}}{1 - s_{0 \text{ max}}}.$$

Максимальное скольжение

$$s_{0 \text{ max}} = \frac{U_{\text{доб}}}{E_{2\text{H}}}.$$

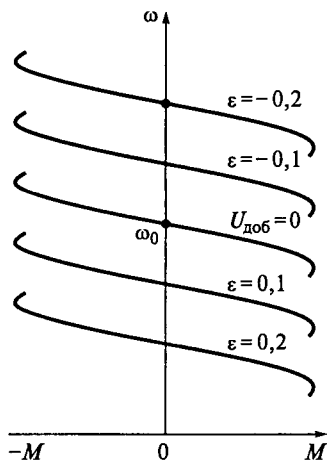


Рис. 6.22. Механические характеристики двигателей двойного питания

Так как преобразователь частоты с непосредственной связью, как правило, обеспечивает регулирование частоты до 20 Гц (при частоте питания 50 Гц), чему соответствует максимальное скольжение $S_{0\max} = 0,4$, то максимальный диапазон регулирования скорости двигателя двойного питания

$$D = 1,4 \omega_0 / 0,6 \omega_0 \approx 2,3 : 1.$$

Регулирование скорости в схеме двигателя двойного питания осуществляется изменением значения и знака относительной добавочной ЭДС $\epsilon = U_{\text{доб}} / U_{2н}$, при этом частота на выходе преобразователя автоматически поддерживается равной частоте тока ротора. Механические характеристики двигателя двойного питания приведены на рис. 6.22. Пуск двигателя до достижения минимальной рабочей скорости выполняется так же, как и в схемах вентильного каскада (см. рис. 6.19).

Основным достоинством схем вентильного каскада и двигателей двойного питания является высокий КПД, сохраняющийся при регулировании скорости в заданном диапазоне.

Поскольку эти системы регулируемого асинхронного привода имеют ограниченный диапазон регулирования (как правило, не выше 2:1), то эти системы применяют главным образом для привода мощных (выше 250 кВт) турбомеханизмов: вентиляторов, центробежных насосов и др.

6.6. Вентильные двигатели

6.6.1. Бесщеточные двигатели постоянного тока

Под вентильным двигателем понимают систему регулируемого электропривода, состоящую из электродвигателя переменного тока, конструктивно подобного синхронной машине, вентильного преобразователя и устройств управления, обеспечивающих коммутацию цепей обмоток электродвигателя в зависимости от положения ротора двигателя. Благодаря этому вентильный двигатель подобен двигателю постоянного тока, в котором посредством коллекторного коммутатора подключается тот виток обмотки якоря, который находится под полюсами возбуждения.

Двигателям постоянного тока присущи серьезные недостатки, обусловленные главным образом наличием щеточно-коллекторного аппарата:

- недостаточная надежность коллекторного аппарата, необходимость его периодического обслуживания;

- ограниченные напряжение на якоре и, следовательно, мощность, вследствие чего их не применяют для высокоскоростных приводов большой мощности;

небольшая перегрузочная способность, невысокая скорость изменения тока якоря, что препятствует их применению для высокодинамичных электроприводов.

В вентильном двигателе указанные недостатки не проявляются, поскольку здесь щеточно-коллекторный коммутатор заменен бесконтактным коммутатором, выполненным на тиристорах (для приводов большой мощности) или на транзисторах (для приводов мощностью до 200 кВт). Поэтому вентильный двигатель, который конструктивно выполняется на базе синхронной машины, часто называют бесконтактным двигателем постоянного тока. По управляемости вентильный двигатель также подобен двигателю постоянного тока: его скорость регулируется изменением подводимого постоянного напряжения. Благодаря своим хорошим регулировочным качествам вентильные двигатели получили широкое применение для привода различных промышленных машин и механизмов.

6.6.2. Электроприводы по системе «транзисторный коммутатор — вентильный двигатель с постоянными магнитами»

Вентильный двигатель (рис. 6.23) в рассматриваемом приводе выполнен на базе трехфазной синхронной машины с постоянными магнитами на роторе. Трехфазные обмотки статора питаются постоянным током, подаваемым поочередно в две последователь-

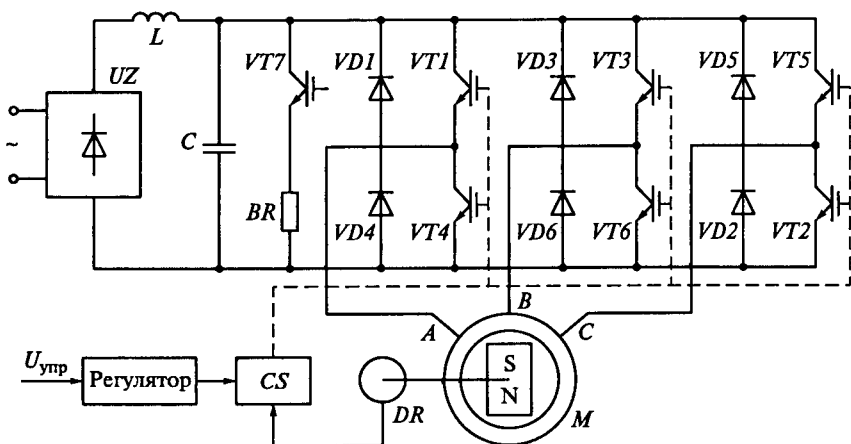


Рис. 6.23. Схема вентильного двигателя с транзисторным коммутатором:

$U_{упр}$ — напряжение управления; CS — устройство управления транзисторами; DR — датчик положения ротора

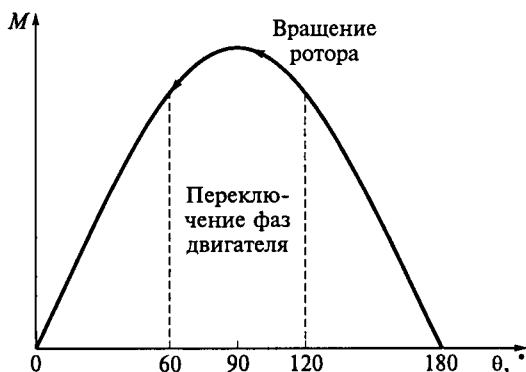


Рис. 6.24. Зависимость момента двигателя от угла между векторами потоков статора и ротора (при $p_n = 1$)

но соединенные фазные обмотки. Переключение обмоток выполняется транзисторным коммутатором, выполненным по трехфазной мостовой схеме. Транзисторные ключи открываются и закрываются в зависимости от положения ротора двигателя.

Момент, создаваемый двигателем, определяется взаимодействием двух потоков: статора Φ_1 , создаваемого током в обмотках статора, и ротора Φ_2 , создаваемого высокоэнергетическими постоянными магнитами (на основе сплавов самарий — кобальт и др.).

$$M = k\Phi_1\Phi_2 \sin\left(\frac{\theta}{p_n}\right), \quad (6.27)$$

где k — конструктивный коэффициент; θ — пространственный угол между векторами потоков статора и ротора.

Магнитный поток статора стремится повернуть ротор с постоянными магнитами так, чтобы поток ротора совпал по направлению с потоком статора (подобно магнитной стрелке компаса).

Наибольший момент, создаваемый на валу ротора, будет при угле 90° между векторами потоков. Он уменьшается до нуля по мере сближения векторов потоков (рис. 6.24).

Рассмотрим пространственную диаграмму векторов потоков, соответствующую двигательному режиму (при числе пар полюсов $p_n = 1$). Предположим, что в данный момент включены транзисторы $VT3$ и $VT4$ (см. рис. 6.23). Тогда ток проходит через обмотку фазы B и в обратном направлении через обмотку фазы A . Результирующий вектор МДС статора будет занимать в пространстве положение F_3 (рис. 6.25). Если ротор занимает в этот момент положение, показанное на рис. 6.26, то двигатель будет в соответствии с формулой (6.27) развивать максимальный момент, под действи-

Далее следует переключать транзисторы в порядке возрастания их номеров.

Переключение фаз выполняет транзисторный коммутатор $VT1... VT6$, управляемый от датчика положения ротора DR ; при этом угол $\theta = 90^\circ \pm 30^\circ$, что соответствует максимальному моменту с наименьшими пульсациями. При $p_n = 1$ за один оборот ротора должно быть проведено шесть переключений, благодаря которым МДС статора совершит полный оборот (см. рис. 6.26). При числе пар $p_n > 1$ угол поворота вектора МДС статора, а следовательно, и ротора, составит $360^\circ/p_n$.

Регулирование момента осуществляется изменением значения МДС статора, т. е. изменением среднего значения тока в обмотках статора

$$I_1 = \frac{U_1 - E_{\text{я}}}{2R_1}, \quad (6.28)$$

где R_1 — сопротивление обмотки статора.

Поскольку поток двигателя постоянен, то ЭДС $E_{\text{я}}$, наводимая в двух последовательно включенных обмотках статора, будет пропорциональна скорости ротора.

Уравнение электрического равновесия для цепей статора будет следующим:

$$U_1 = k\Phi_2\omega + 2I_1R_1 + 2L_1 \frac{dI_1}{dt}, \quad (6.29)$$

где L_1 — индуктивность обмотки статора.

При отключении транзисторных ключей ток в обмотках статора мгновенно не исчезает, а замыкается через обратные диоды и фильтровый конденсатор C .

Следовательно, регулируя напряжение питания двигателя U_1 , можно регулировать ток статора и момента двигателя:

$$M = k\Phi_2 I_1, \quad (6.30)$$

где k — конструктивный коэффициент.

Очевидно, что выражения (6.28)... (6.30) аналогичны выражениям для двигателя постоянного тока, вследствие чего механические характеристики вентильного двигателя в данной схеме подобны характеристикам двигателя постоянного тока независимого возбуждения при $\Phi = \text{const}$.

Изменение напряжения питания вентильного двигателя в рассматриваемой схеме осуществляется методом широтно-импульсного регулирования. Изменяя скважность импульсов транзисторов $VT1... VT6$ (см. рис. 6.23) в периоды их включенного состояния

с помощью регулятора, можно регулировать среднее значение напряжения, подаваемого на обмотки статора двигателя.

Для осуществления режима торможения алгоритм работы транзисторного коммутатора должен быть изменен таким образом, чтобы вектор МДС статора отставал от вектора потока ротора. Для этого необходимо, чтобы $U_1 < E_d$. Тогда момент двигателя станет отрицательным. Поскольку на входе преобразователя установлен неуправляемый выпрямитель, то рекуперация энергии торможения в сеть в данной схеме невозможна. При торможении происходит подзаряд конденсатора C . Ограничение напряжения на конденсаторе осуществляется путем подключения разрядного резистора через транзистор $VT7$. Таким образом, энергия торможения рассеивается в разрядном резисторе.

6.6.3. Электроприводы по системе «тиристорный коммутатор — синхронный двигатель»

В качестве вентильных двигателей средней и большой мощности обычно используют синхронные двигатели обычной конструкции с электромагнитным возбуждением. Поскольку двигатели большой мощности имеют напряжение статора 6 или 10 кВ, то в качестве вентильного коммутатора используется тиристорный преобразователь, состоящий из управляемого выпрямителя $UZ1$ (рис. 6.27) и инвертора $UZ2$. Инвертор выполняет функции коммутатора, переключение которого осуществляется от датчика положения ротора DR . Поскольку тиристоры являются полууправляемыми приборами, инвертор работает как зависимый, коммутируемый за счет ЭДС двигателя, которая наводится в обмотках статора вращающимся электромагнитным полем ротора. Для обеспечения устойчивой коммутации вентилей инвертора предусматривается опережение угла их открывания на угол $\beta \leq 15^\circ$, что ведет к некоторому уменьшению момента вентильного двигателя $M = k\Phi_0 I_1 \sin(\theta - \beta)$. Возбуждение двигателя осуществляется возбудителем UZ_L .

Благодаря включению в цепь постоянного тока дросселя L со значительной индуктивностью преобразователь $UZ1...UZ2$ работает как источник тока, значение которого регулируется путем импульсно-фазового регулирования выходного напряжения выпрямителя $UZ1$:

$$I_1 = \frac{k_{cx} U_c \cos \alpha - k\Phi_0 \omega}{R_{\text{экв}}},$$

где U_c — напряжение питания выпрямителя; Φ_0 — поток ротора, создаваемый обмоткой возбуждения; $R_{\text{экв}}$ — эквивалентное сопротивление цепи обмоток статора.

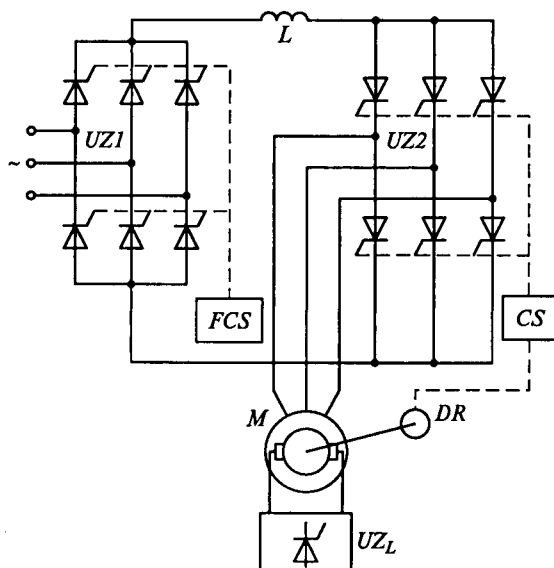


Рис. 6.27. Схема двигателя с тиристорным коммутатором:

$UZ1$ — управляемый выпрямитель; $UZ2$ — инвертор; UZ_L — выпрямитель питания обмотки возбуждения; FCS — устройство управления выпрямителем; CS — устройство управления инвертором; L — дроссель

Изменяя значение тока, можно изменять момент, развиваемый двигателем. Регулирование скорости в приводах рассматриваемого типа обычно выполняется введением внешнего контура регулирования скорости (рис. 6.28). При этом механические характе-

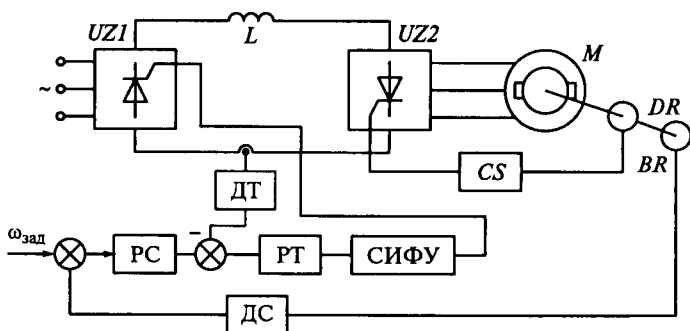


Рис. 6.28. Функциональная схема регулируемого электропривода с вентильным двигателем:

PC — регулятор скорости; PT — регулятор тока; $ДС$ — датчик скорости; $ДТ$ — датчик тока; DR — датчик положения ротора; BR — тахогенератор

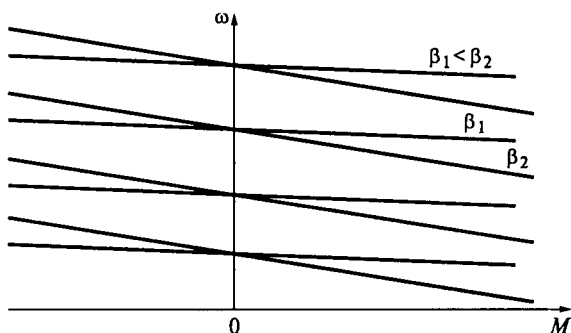


Рис. 6.29. Механические характеристики вентильного двигателя

ристики вентильного двигателя (рис. 6.29) будут подобны характеристикам системы ТП — Д.

При увеличении угла опережения открывания ($\beta_2 > \beta_1$) жесткость механических характеристик уменьшается.

Поскольку в данной схеме входной выпрямитель выполнен управляемым, то возможен режим рекуперативного торможения, когда ЭДС двигателя $k\Phi_0\omega > k_{сх}U_c \cos \alpha \cos \beta$.

Недостаток рассматриваемой схемы — усложнение коммутации тиристоров инвертора при малых скоростях (ниже $0,1\omega_n$), так как при этом ЭДС двигателя становится недостаточной для естественной коммутации клапанов зависимого инвертора. В этом случае при пуске двигателя до достижения скорости $0,1\omega_n$ для обеспечения запирающих клапанов инвертора приходится прерывать ток, запирая тиристоры выпрямителя, что усложняет схему его управления.

В последние годы с появлением IGB-транзисторов и запираемых тиристоров стали применять схемы с принудительной коммутацией клапанов инвертора, что повышает регулировочные свойства вентильного двигателя и дает возможность его использования для динамичных электроприводов с широким диапазоном регулирования скорости.

Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию способов регулирования асинхронных двигателей.
2. При каких способах регулирования асинхронный двигатель работает с малыми значениями скольжения?
3. Для чего вводят добавочные резисторы в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором?
4. Сколько рабочих скоростей может иметь многоскоростной асинхронный двигатель?

5. Каков основной недостаток способа регулирования скорости асинхронного двигателя при изменении напряжения питания?

6. При каком экономичном способе регулирования асинхронный двигатель работает с большими значениями скольжения?

7. В каких единицах измеряется абсолютное скольжение асинхронного двигателя?

8. Почему при уменьшении частоты напряжения питания ниже номинальной необходимо одновременно регулировать напряжение?

9. Каковы соотношения между частотой и значением питающего напряжения при частотном регулировании асинхронного двигателя?

10. Как влияет падение напряжения на активном сопротивлении обмоток статора на механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании?

11. Как изменится (по сравнению с номинальным) длительно допустимый момент асинхронного двигателя, если увеличивать частоту напряжения выше номинальной, сохранив напряжение равным номинальному?

12. Приведите классификацию полупроводниковых преобразователей частоты, используемых в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах.

13. Какой диапазон изменения выходной частоты характерен для преобразователей частоты с непосредственной связью?

14. Каковы различия схем преобразователей частоты с автономным инвертором тока и автономным инвертором напряжения?

15. На сколько двигателей можно подавать питание от одного преобразователя частоты типа инвертора тока?

16. Какие способы регулирования выходного напряжения используют в преобразователях частоты с промежуточной цепью постоянного тока и инвертором напряжения?

17. Из каких основных элементов состоит вентильный двигатель как система регулируемого электропривода?

18. Почему вентильный двигатель называют бесщеточным двигателем постоянного тока?

19. С какой целью в вентильных двигателях используют датчик положения ротора?

7.1. Вентильно-индукторные электроприводы

Перспективными системами регулируемого электропривода являются вентильно-индукторные электроприводы, использующие индукторную электрическую машину с пассивным ротором. На статоре такой машины находятся электромагниты — индукторы (рис. 7.1), по обмоткам которых поочередно пропускается постоянный ток. Ротор двигателя не имеет обмоток (пассивный) и содержит ряд зубцов, число которых не совпадает с числом зубцов магнитопровода статора. На рис. 7.1 показана машина, имеющая шесть зубцов магнитопровода на статоре и четыре на роторе.

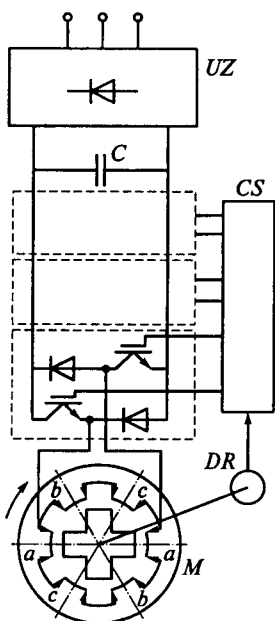


Рис. 7.1. Функциональная схема вентильно-индукторного привода

Машина управляется вентильным (транзисторным) коммутатором, осуществляющим переключение обмоток индукторов. Основная особенность вентильно-индукторных приводов заключается в том, что переключение обмоток индукторов осуществляется в соответствии с положением ротора с помощью датчика положения DR .

Принцип работы вентильно-индукторного привода состоит в поочередном последовательном включении индукторов ($a-a$, $b-b$, $c-c$), поток которых замыкается через зубцы ротора.

Возбуждение индуктора вызывает возникновение электромагнитных сил притяжения между зубцами индуктора и ближайшими к ним зубцами ротора.

Под действием этих сил (момента) ротор поворачивается и занимает такое положение, при котором зубцы ротора устанавливаются напротив зубцов возбужденной фазы. Так как число зубцов статора и ротора различно, то в том положении, которое является согласованным для одного индуктора, для следующего индуктора зуб-

цы ротора окажутся в несогласованном положении. Поэтому при отключении первого индуктора и включении последующего ротор снова повернется на одно полюсное деление. Последовательная коммутация индукторов с помощью датчика положения через систему управления *CS* обеспечивает непрерывное создание вращающего момента и, следовательно, непрерывное вращение ротора двигателя.

Значение электромагнитного момента определяется средним значением тока, подаваемого в обмотки индукторов. Поэтому регулирование момента двигателя выполняют изменением напряжения, подводимого к обмоткам индуктора. В схеме на рис. 7.1 изменение напряжения проводится методом широтно-импульсного регулирования. Для точного регулирования скорости в рассматриваемых приводах вводят внешний контур регулирования.

Вентильно-индукторные электроприводы характеризуются конструктивной простотой и экономичностью. Они находят применение для общепромышленных механизмов мощностью примерно до 50 кВт, к качеству регулирования которых не предъявляются высокие требования. Особенно эффективно использование вентильно-индукторных приводов для механизмов с номинальной частотой вращения 6000 мин^{-1} и выше.

7.2. Электроприводы с шаговыми двигателями

Исполнительные органы некоторых рабочих машин и механизмов должны совершать строго дозированные перемещения с фиксацией своего положения в конце движения. Типичными примерами таких механизмов являются механизмы подачи некоторых металлорежущих станков, сборочных агрегатов, манипуляторов и других машин. Для привода подобных машин используют шаговые электродвигатели. Особенностью таких двигателей является то, что их движение (угол поворота для двигателей вращательного движения или перемещение для двигателей поступательного движения) носит не непрерывный, а дискретный характер. Электропривод с такими двигателями часто называют дискретным электроприводом.

Широкое применение дискретного электропривода определяется тем, что по принципу своей работы он сочетается с цифровыми системами управления: микропроцессорами и устройствами числового программного управления, которые все шире применяют во всех областях техники. Шаговые двигатели выпускаются промышленностью мощностью от нескольких ватт до нескольких киловатт [11]. Двигатели характеризуются развиваемым моментом (усилием) и шагом (дискретой). Чем меньше величина шага, тем с большей точностью осуществляется перемещение рабочего органа машины.

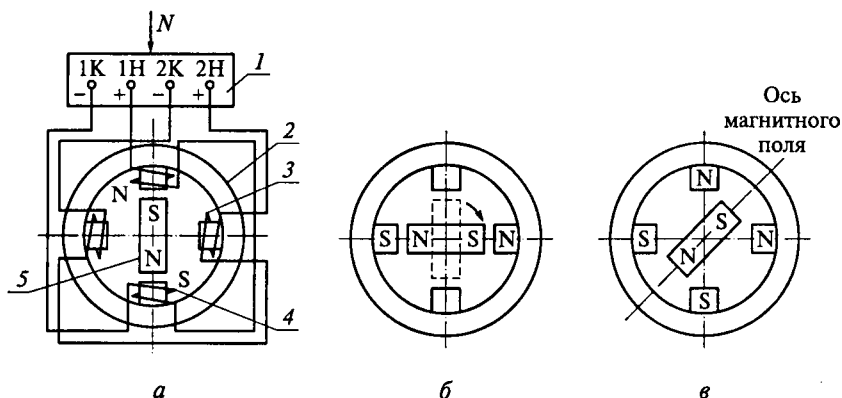


Рис. 7.2. Упрощенная схема шагового двигателя с активным ротором: *а* — схема шагового двигателя: 1 — клеммы обмоток статора; 2 — магнитопровод статора; 3, 4 — обмотки статора; 5 — ротор; *б* — поворот ротора на один шаг; *в* — поворот ротора на 45°

Принцип действия шагового двигателя рассмотрим на примере простейшей схемы двухфазного двигателя с активным ротором (рис. 7.2). Такой шаговый двигатель имеет на статоре две пары явно выраженных полюсов, на которых находятся обмотки возбуждения, образующие две фазы двигателя. На активном роторе находится постоянный магнит. Питание обмоток осуществляется импульсами напряжения, поступающими с устройства управления, которое распределяет управляющие импульсы, число которых равно заданному числу шагов по каналам. Число каналов равно числу фаз двигателя.

Если напряжение определенной полярности подано на первую обмотку (1Н—1К), то ротор двигателя занимает положение, показанное на рис. 7.2, *а*. Это положение будет устойчивым, поскольку при отклонении от него на ротор будет действовать момент, стремящийся вернуть ротор в прежнее положение.

Для выполнения шага движения напряжение снимают с первой обмотки и подают на вторую (2Н—2К). При этом ротор двигателя сделает шаг, т. е. повернется на угол $\pi/2$ (рис. 7.2, *б*). Для выполнения второго шага нужно снять напряжение с обмотки 2Н—2К и подать импульс напряжения обратной полярности на обмотку 1Н—1К и т. д.

За один шаг угловое перемещение шагового двигателя

$$\alpha = \pi / (pn),$$

где p — число пар полюсов ротора (на рис. 7.2 $p = 1$); n — число фаз статорных обмоток.

Кроме рассмотренного алгоритма коммутации может быть применен более сложный алгоритм, позволяющий в 2 раза уменьшить шаг. Пусть исходное положение соответствует условию включения обмотки 1Н—1К. Не снимая напряжение с обмотки 1, подключим обмотку 2Н—2К с полярностью, соответствующей рис. 7.2, в. При этом пространственный вектор результирующей МДС будет располагаться между полюсами статора, т. е. ось магнитного потока повернется на угол $\pi/4$. Соответственно ротор повернется на половину полюсного деления, т. е. на $\pi/4$.

Для реверса шагового двигателя следует изменить полярность импульсов напряжения. Каждому импульсу управления соответствует один шаг поворота ротора. Суммарный угол поворота ротора φ соответствует числу поступающих импульсов управления N :

$$\varphi = \alpha N,$$

а средняя скорость поворота — частоте коммутаций f_k :

$$\omega = \alpha f_k.$$

Частота коммутаций является важным параметром шагового электропривода, так как она определяет время отработки управляющего воздействия. Допустимая частота коммутаций (ее называют частотой приемистости) ограничивается электромагнитной инерционностью обмоток и механической инерцией ротора и приводимого механизма. Чем выше инерционность двигателя и больше статический момент на валу двигателя, тем меньше частота приемистости.

Современные шаговые двигатели различны по конструктивному исполнению. Двигатели бывают однофазными, двухфазными и многофазными с активным и пассивным роторами.

Активный ротор имеет шаг от $\pi/12$ до $\pi/2$. Частота коммутаций таких двигателей не превышает примерно 500 Гц.

Для шаговых двигателей с малым шагом используют пассивный ротор без обмоток и магнитов (рис. 7.3). Статор реактивного шагового двигателя имеет явно выраженные полюсы, на которых нарезаны зубцы числом Z_c . На роторе равномерно по окружности нарезано четное (но не делящееся на четыре) число зубцов Z_p . Выбором числа зубцов ротора достигается смещение в любом положении зубцов ротора по отношению к зубцам смежных полюсных выступов статора на $1/4$ зубцового деления.

Работа шаговых двигателей с пассивным реактивным ротором заключается в том, что при подаче напряжения на какую-либо фазу статора ротор стремится занять такое положение, чтобы зубцы ротора оказались напротив зубцов соответствующего полюса и проницаемость магнитной цепи, по которой замыкается поток данной фазы, была наибольшей.

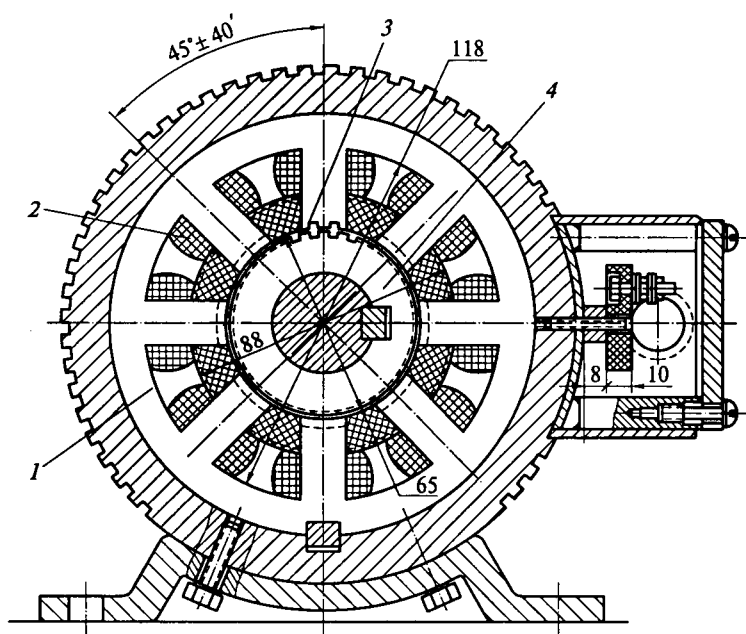


Рис. 7.3. Поперечный разрез четырехполюсного шагового двигателя с пассивным ротором:

1 — магнитопровод статора; 2 — обмотки статора; 3 — зубцы статора и ротора; 4 — магнитопровод ротора

При подаче тока в следующую фазу статора ротор повернется на один шаг так, чтобы зубцы ротора совпали с зубцами полюса следующей фазы. При этом угловой шаг

$$\alpha = 2\pi \frac{Z_p - Z_c}{Z_p Z_c}.$$

Шаговые двигатели применяют в приводах, где требуется регулирование положения рабочего органа, а также широко используют для привода часов.

7.3. Электроприводы с линейными двигателями

Большинство электродвигателей является электродвигателями вращательного движения. В то же время многие рабочие органы производственных машин должны в соответствии с технологией осуществлять поступательное (например, конвейеры) или возвратно-поступательное движение (например, механизмы подачи станков, манипуляторы, поршневые машины). Преобразование вра-

щательного движения в поступательное осуществляется посредством специальных кинематических звеньев: винт — гайка, шестерня — зубчатая рейка, кривошипно-шатунная передача и др.

Для привода рабочих органов, совершающих поступательное и возвратно-поступательное движение, используют двигатели, подвижная часть которых движется линейно.

В настоящее время получают развитие электроприводы с линейными асинхронными, вентильными и шаговыми двигателями. Принципиально линейный двигатель любого типа может быть образован из двигателя вращательного движения путем линейной развертки цилиндрического статора в плоскость [11].

Представление об устройстве линейного асинхронного двигателя можно получить, если развернуть статор асинхронного двигателя в плоскость. При этом вектор намагничивающих сил статора будет линейно перемещаться вдоль развертки статора, т.е. при этом образуется не вращающееся (как в обычных двигателях), а бегущее электромагнитное поле статора. В качестве вторичного элемента может использоваться ферромагнитная полоса, располагаемая с небольшим воздушным зазором вдоль развертки статора. Эта полоса играет роль короткозамкнутого ротора. Вторичный элемент увлекается движущимся полем статора и линейно перемещается со скоростью, меньшей скорости движения поля статора на величину, равную линейному абсолютному скольжению.

Линейная скорость (м/с) бегущего электромагнитного поля

$$v_0 = 3\tau f_1,$$

где τ — полюсное деление — расстояние между соседними полюсами линейного асинхронного двигателя; f_1 — частота напряжения питания.

Скорость вторичного элемента $v = v_0(1 - s_d)$, где s_d — относительное линейное скольжение.

При питании двигателя напряжением стандартной частоты получаемые скорости поля будут достаточно велики ($v > 3$ м/с), что затрудняет использование этих двигателей для привода промышленных механизмов. Такие двигатели применяют для высокоскоростных транспортных механизмов. Для получения более низких скоростей движения и регулирования скорости линейного асинхронного двигателя питание на его обмотки поступает от преобразователя частоты.

Применяются несколько вариантов конструкций линейного асинхронного двигателя. Конструкция однокоординатного двигателя показана на рис. 7.4. Вторичный элемент — ротор 2, соединенный с рабочим органом, перемещается по направляющим 5 под действием бегущего электромагнитного поля, созда-

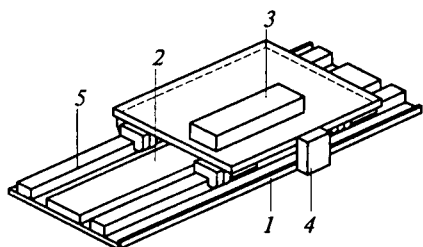


Рис. 7.4. Линейный однокоординатный двигатель:

1 — станина; 2 — ротор; 3 — статор; 4 — датчик пути; 5 — направляющие

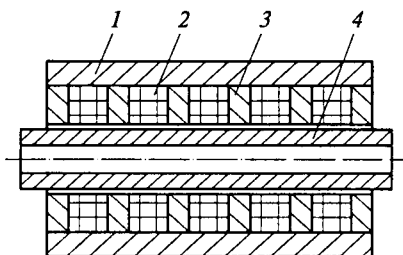


Рис. 7.5. Конструкция цилиндрического линейного двигателя:

1 — магнитопровод статора; 2 — катушечные обмотки статора; 3 — ферромагнитные шайбы; 4 — ротор

ваемого статором 3. Такая конструкция удобна для компоновки с рабочей машиной, однако у такого двигателя значительны потоки рассеяния поля статора, вследствие чего $\cos \phi$ двигателя низкий.

Для увеличения электромагнитной связи между статором и вторичным элементом последний размещают в прорезь между двумя статорами либо двигатель выполняют в виде цилиндра (рис. 7.5). В этом случае статор двигателя представляет собой трубку — магнитопровод 1, внутри которого расположены цилиндрические наборные катушки 2, являющиеся обмоткой статора. Между катушками размещены ферромагнитные шайбы 3, являющиеся частью магнитопровода. Вторичный элемент — шток трубчатой формы — выполнен из ферромагнитного материала.

Линейные асинхронные двигатели могут также иметь обращенную конструкцию, когда вторичный элемент неподвижен, а перемещается статор. Такие двигатели обычно применяют на транспортных средствах. В этом случае в качестве вторичного элемента используют рельс или специальную полосу, а статор размещают на подвижной тележке.

Недостатками линейных асинхронных двигателей являются низкий КПД и связанные с этим потери энергии, прежде всего во вторичном элементе (потери скольжения).

В последнее время кроме асинхронных начали применять синхронные (вентильные) двигатели. Принцип работы вентильного двигателя был рассмотрен в гл. 6, он идентичен принципу действия линейного асинхронного двигателя. Конструкция вентильного двигателя аналогична конструкции, показанной на рис. 7.4. Статор двигателя развернут в плоскость, а на вторичном элементе размещаются постоянные магниты. Возможен вариант обращенной конструкции, когда статор является подвижной частью, а вто-

ричный элемент с постоянными магнитами неподвижен. Переключение обмоток статора выполняется в зависимости от относительного положения магнитов. С этой целью в конструкции должен быть предусмотрен датчик положения.

Для позиционных приводов эффективно применяют также линейные шаговые двигатели. Если развернуть в плоскость статор шагового двигателя, показанного на рис. 7.3, а вторичный элемент выполнить в виде пластины, на которой путем фрезерования канавок образованы зубцы, то при соответствующем переключении обмоток статора вторичный элемент будет совершать дискретное движение, шаг которого может быть весьма малым — до долей миллиметра. Часто применяют обращенную конструкцию, в которой вторичный элемент неподвижен.

Скорость линейного шагового двигателя определяется зубцовым делением τ , числом фаз m и частотой переключения $f_{\text{пк}}$:

$$v = \frac{\tau f_{\text{пк}}}{m}.$$

Получение высоких скоростей движения не вызывает трудностей, поскольку увеличение зубцового деления и частоты не лимитируется технологическими факторами. Ограничения существуют для минимального τ , так как отношение зубцового деления к зазору между статором и вторичным элементом должно быть не меньше 10.

Использование дискретного привода позволяет не только упростить конструкцию механизмов, совершающих линейное однокоординатное движение, но и дает возможность с помощью одного привода получить двух- или многокоординатное движение. Если на статоре подвижной части расположить ортогонально две системы обмоток, а во вторичном элементе выполнить канавки в двух взаимно перпендикулярных направлениях, то подвижный элемент будет совершать дискретное движение в двух координатах, т.е. обеспечивать перемещение на плоскости. В этом случае необходимо создать опору для подвижного элемента. Для ее решения может быть использована воздушная подушка — воздух, подаваемый под давлением в пространство под подвижным элементом.

Линейные шаговые двигатели развивают относительно низкую тяговую силу и имеют низкий КПД. Основной областью их применения являются легкие манипуляторы, легкие станки для сборки, измерительные машины, станки для лазерной резки и другие устройства.

Благодаря применению линейных двигателей отпадает необходимость применения кинематических звеньев, преобразующих вращательное движение в поступательное.

Контрольные вопросы

1. Почему в вентильно-индукторном электроприводе число зубцов магнитопровода статора не совпадает с числом зубцов магнитопровода ротора?
2. Что такое дискретный электропривод?
3. Для привода каких механизмов и устройств целесообразно применение шаговых электродвигателей?
4. Что такое частота перемагничивания шаговых двигателей?
5. Каково основное преимущество линейных электродвигателей?
6. В чем состоит основное отличие линейных асинхронных двигателей от линейных синхронных (вентильных) двигателей?

8.1. Общие сведения

При пуске и останове электродвигателя, при его реверсе, изменении задания на скорость в регулируемом электроприводе, при приложении (или снятии) к валу двигателя механической нагрузки изменяются координаты электропривода: ток, момент, скорость и др. При этом привод переходит из одного установившегося режима работы с одними координатами движения в другой установившийся режим с другими координатами. Однако этот переход не может быть мгновенным, так как ток в двигателе из-за электромагнитной инерционности его цепей не может изменяться мгновенно, также не может изменяться мгновенно скорость двигателя из-за механической инерционности движущихся масс электропривода.

Переходным процессом (переходным режимом) электропривода называют процесс перехода из одного установившегося режима работы (или отключенного состояния) в другое установившееся состояние.

Причины возникновения переходных процессов следующие:

- управляющие воздействия (включение-отключение электропривода, изменение задания на скорость привода и др.);
- возмущающие воздействия, главным из которых является изменение нагрузки на валу двигателя (изменение M_c).

Необходимость формирования переходных процессов определяется тем, что многие электроприводы работают в интенсивных динамических режимах, в которых происходит резкое приложение нагрузки, необходимо быстрое изменение скорости и т.д. Таковы электроприводы металлорежущих станков, горных экскаваторов, прокатных станов и других машин. Для этих машин необходимо сокращать длительность переходных процессов, т.е. повышать быстродействие электропривода.

Существуют рабочие машины, важнейшим требованием к которым является стабильность скорости (например, машины для производства бумаги, пленки и т.п.). Для них при приложении возмущающих воздействий важна минимизация отклонения от заданных параметров движения.

Большое значение имеет анализ переходных процессов для следящих электроприводов, которые работают, как правило, в переходных режимах, обрабатывая изменяющиеся задания скорости и положения.

Переходные процессы могут быть колебательными или апериодическими (рис. 8.1). Их характеризуют следующие показатели качества:

время $t_{п.п}$ переходного процесса — время, начиная с которого регулируемый параметр Y входит и остается в зоне допустимых отклонений от заданного значения $Y_{зад}$. Обычно в системах электропривода эта зона принимается равной $\pm 2\%$ или $\pm 5\%$ от заданного значения регулируемого параметра;

время t_n нарастания до заданного значения — время, когда регулируемый параметр Y первый раз достигает заданного значения;

перерегулирование $\sigma = \frac{Y_{max} - Y_{зад}}{Y_{зад}} 100$ — это относительное превышение максимального значения регулируемого параметра над заданным значением, %.

Эти показатели качества переходных процессов нормируют для случая, когда на систему регулирования действует ступенчатое (единичное) управляющее или возмущающее воздействие.

Для расчета и анализа переходных процессов необходимо найти переходную функцию — зависимость переменных величин электропривода (скорости, тока, момента и др.) от времени.

Переходные функции описываются дифференциальными уравнениями. Порядок дифференциального уравнения определяется

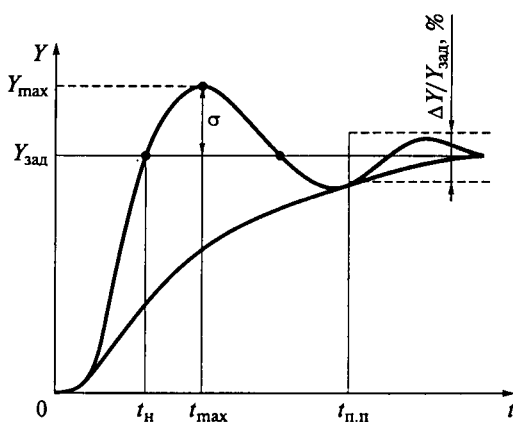


Рис. 8.1. Динамическая (переходная) характеристика системы регулирования

числом инерционностей, которые учитывают при рассмотрении данного переходного процесса.

Ниже перечислены основные инерционности, характерные для электроприводов.

Механическая инерционность связана с накоплением и отдачей кинетической энергии. Для вращательного движения механическая инерционность определяется моментом инерции J_{Σ} , приведенным к валу электродвигателя. При анализе переходных процессов механическая инерционность оценивается электромеханической постоянной времени

$$T_m = \frac{J_{\Sigma}}{\beta}, \quad (8.1)$$

где β — модуль (без учета знака) жесткости механической характеристики электропривода.

Электромагнитная инерционность объясняется накоплением (отдачей) энергии электромагнитного поля.

Эта инерционность оценивается электромагнитной постоянной времени

$$T_{\Sigma} = \frac{L}{R}, \quad (8.2)$$

где L и R — соответственно индуктивность и активное сопротивление электромагнитного устройства (например, обмотки двигателя).

Электростатическая инерционность объясняется накоплением (отдачей) энергии электростатического поля. Эта инерционность оценивается постоянной времени

$$T_c = RC, \quad (8.3)$$

где R — сопротивление цепи заряда-разряда; C — емкость конденсатора.

Существуют инерционности и другой физической природы, которые иногда следует учитывать при анализе переходных процессов.

Если предположить, что инерционности отсутствуют или они пренебрежимо малы, то переходные процессы будут протекать мгновенно. Наличие в реальных системах инерционностей различной физической природы обуславливает увеличение времени переходных процессов, связанное с тем, что в процессе перехода системы из одного состояния в другое происходит накопление (запасание) или отдача энергии, которые не могут происходить мгновенно.

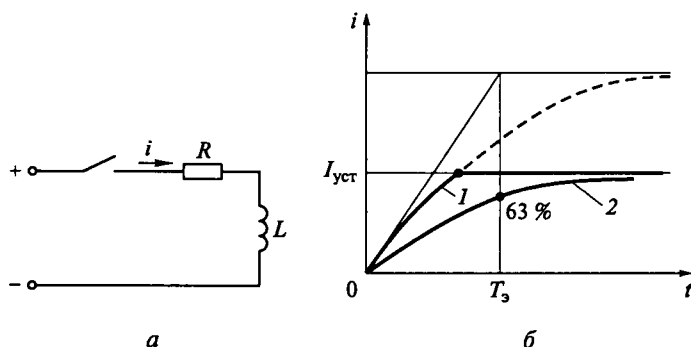


Рис. 8.2. Расчетная схема (а) при включении обмотки возбуждения и переходные характеристики (б):

1 — без форсировки; 2 — с форсировкой

Если потоки энергии однонаправлены, то переходный процесс при приложении постоянного по значению воздействия носит монотонный характер. Таков, например, процесс нарастания тока в обмотке возбуждения двигателя постоянного тока при подаче напряжения на эту обмотку (рис. 8.2, а).

Процесс изменения тока во времени при подаче напряжения на обмотку описывается дифференциальным уравнением

$$U = iR + L \frac{di}{dt}.$$

Приведя его к нормализованному виду с учетом (8.2), получим

$$T_э \frac{di}{dt} + i = \frac{U}{R} = I_{уст}, \quad (8.4)$$

где $I_{уст}$ — установившийся ток возбуждения.

В операторной форме (полагая $d/dt = p$) уравнение (8.4) примет вид

$$i(T_э p + 1) = I_{уст}. \quad (8.5)$$

Решив его, получим

$$i = I_{уст} - (I_{уст} - I_{нач})e^{-t/T_э}, \quad (8.6)$$

где $I_{нач}$ — начальный ток.

При $I_{нач} = 0$

$$i = I_{уст}(1 - e^{-t/T_э}). \quad (8.7)$$

Переходная характеристика $i = f(t)$ носит экспоненциальный характер (рис. 8.2, б). За время T_z ток в обмотке возбуждения возрастает до $0,63I_{уст}$, за время $3T_z$ — до $0,95I_{уст}$, за время $5T_z$ — до $0,996I_{уст}$.

Практически можно считать, что время переходного процесса при экспоненциальном характере составляет три-пять постоянных времени. Если нужно ускорить нарастание тока в обмотке возбуждения, то это можно сделать единственным способом — увеличить напряжение, подводимое к катушке индуктивности (обмотке возбуждения) на время протекания переходного процесса. Если, например, мы увеличим напряжение в a раз до $U_\phi = aI_{уст}R$, то ток в обмотке возбуждения будет нарастать быстрее (см. характеристику I).

По достижении тока $I_{уст}$ напряжение на обмотке возбуждения следует уменьшить до

$$U = I_{уст}R.$$

Таким образом, для уменьшения времени переходного процесса нужно применить форсировку напряжения, которая затем снимается. Отношение $\alpha = U_\phi/U$ называют коэффициентом форсировки.

8.2. Переходные процессы, определяемые механической инерционностью электропривода

Переходные процессы в электроприводе, в процессе которых изменяются ток, момент и скорость двигателя, представляют собой сложное явление — одновременное протекание электромагнитных и механических переходных процессов. Характер переходного процесса зависит от числа инерционностей, участвующих в данном процессе, и соотношения между характеризующими их постоянными времени.

Переходные процессы в зависимости от характера объекта могут описываться линейными или нелинейными дифференциальными уравнениями. Если нелинейности незначительны, можно осуществить линеаризацию уравнений.

В случае линейных систем анализ переходных процессов (расчет переходных характеристик) может проводиться аналитическими методами. В случае нелинейных систем целесообразно пользоваться численными методами решения уравнений на ЭВМ или методами компьютерного моделирования.

Если постоянные времени различаются на два порядка и более, то можно малыми постоянными времени пренебрегать.

Проведем анализ электромеханической системы, состоящей из двигателя с линейной механической характеристикой и жесткого механического звена.

Движение такой электромеханической системы описывается уравнением движения электропривода (см. подразд. 2.3)

$$M - M_c = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}, \quad (8.8)$$

где J_Σ и M_c — соответственно суммарный момент инерции и момент сопротивления движению, приведенные к валу двигателя.

Линейная механическая характеристика описывается уравнением

$$M = \beta(\omega_0 - \omega), \quad (8.9)$$

где ω_0 — скорость идеального холостого хода.

В результате совместного решения уравнений (8.8) и (8.9) получим уравнение, описывающее переходные процессы двигателя, определяемые механической инерционностью электропривода:

$$\frac{J_\Sigma}{\beta} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta}. \quad (8.10)$$

Величина M_c/β представляет собой падение скорости от нагрузки — статическую ошибку $\Delta\omega_c$ (см. подразд. 4.2), а величина $(\omega_0 - M_c/\beta)$ — установившуюся скорость $\omega_{уст}$ после окончания переходного процесса, когда $M = M_c$ (рис. 8.3, а).

Тогда, обозначив

$$\frac{J_\Sigma}{\beta} = T_m, \quad (8.11)$$

получим выражение для переходной характеристики электропривода

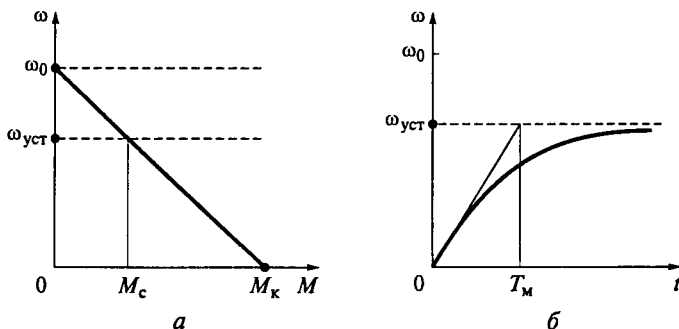


Рис. 8.3. Характеристики переходного процесса пуска электропривода:
а — механическая; б — переходная

$$T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{уст}. \quad (8.12)$$

Переходные процессы, определяемые одной механической инерционностью — суммарным приведенным к валу двигателя моментом инерции J_Σ , описываются дифференциальным уравнением первого порядка. Решением этого уравнения является переходная характеристика, имеющая вид экспоненты с постоянной времени T_m (рис. 8.3, б):

$$\omega = \omega_{уст} - (\omega_{уст} - \omega_{нач}) e^{-t/T_m}, \quad (8.13)$$

где $\omega_{нач}$ — начальная скорость.

При $\omega_{нач} = 0$

$$\omega = \omega_{уст} (1 - e^{-t/T_m}). \quad (8.14)$$

Пример 8.1. Построить характеристики переходного процесса при пуске двигателя постоянного тока независимого возбуждения вхолостую с дальнейшим приложением номинального момента нагрузки. Пуск выполняется подачей номинального напряжения на якорь двигателя; обмотка возбуждения была включена перед пуском. Для ограничения пускового тока в цепь якоря двигателя введен добавочный резистор. Максимально допустимый ток при пуске $I_{пуск} = 2,5 I_{я.н.}$. По окончании пуска добавочный резистор должен быть закорочен.

Технические данные двигателя: мощность $P_n = 6,5$ кВт; номинальная скорость $\omega_n = 104,5$ с⁻¹; номинальное напряжение $U_{я.н.} = 220$ В; номинальный ток якоря $I_{я.н.} = 33,5$ А; сопротивление цепи якоря $R_{я.н.} = 0,77$ Ом; индуктивность якоря $L_{я.н.} = 0,01$ Гн; момент инерции привода $J_\Sigma = 1,0$ кг · м².

Решение. 1. Номинальный момент двигателя

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{6500}{104,5} = 62,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Машинная постоянная

$$C = \frac{M_n}{I_{я.н.}} = \frac{62,2}{33,5} = 1,86 \text{ (Н} \cdot \text{м) / А} = 1,86 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

3. Скорость холостого хода при $U_{я.н.} = U_n = 220$ В

$$\omega_0 = \frac{U_{я.н.}}{C} = \frac{220}{1,86} = 118,3 \text{ с}^{-1}.$$

4. Сопротивление добавочного резистора, вводимого в цепь якоря,

$$R_{\text{доб}} = \frac{U_{\text{я.н}}}{I_{\text{пуск}}} - R_{\text{я}} = \frac{220}{2,5 \cdot 33,5} - 0,77 = 1,86 \text{ Ом.}$$

5. Максимальный момент при пуске

$$M_{\text{к}} = 2,5 M_{\text{н}} = 2,5 \cdot 62,2 = 155,5 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

6. Жесткость естественной механической характеристики

$$\beta = \frac{C^2}{R_{\text{я}}} = \frac{1,86^2}{0,77} = 4,5 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)/с.}$$

7. Жесткость пусковой механической характеристики

$$\beta_{\text{п}} = \frac{C^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{доб}}} = \frac{1,86^2}{0,77 + 1,86} = 1,32 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)/с.}$$

8. Электромеханическая постоянная времени при работе на естественной характеристике

$$T_{\text{м}} = \frac{J_{\Sigma}}{\beta} = \frac{1,0}{4,5} = 0,22 \text{ с.}$$

9. Электромеханическая постоянная времени при работе на пусковой характеристике

$$T_{\text{м.п}} = \frac{J_{\Sigma}}{\beta_{\text{п}}} = \frac{1,0}{1,32} = 0,76 \text{ с.}$$

10. Электромагнитная постоянная времени при работе на естественной характеристике

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{0,01}{0,77} = 0,013 \text{ с.}$$

Поскольку $T_{\text{я}} \ll T_{\text{м}}$, то $T_{\text{я}}$ можно пренебречь.

11. Построим характеристику переходного процесса при пуске вхолостую по формуле (8.14) при $T_{\text{м}} = T_{\text{м.п}}$ ($T_{\text{м.п}}$ — постоянная времени при пуске):

$$\omega = \omega_0 (1 - e^{-t/T_{\text{м.п}}}) = 118,3 (1 - e^{-1,31t}).$$

12. По окончании переходного процесса пусковой резистор будет закорочен, после чего к валу двигателя будет приложен момент $M_{\text{с}} = M_{\text{н}}$.

13. Установившаяся скорость после приложения нагрузки

$$\omega_{\text{уст}} = \omega_0 - \frac{M_{\text{с}}}{\beta} = 118,3 - \frac{62,2}{4,5} = 104,5 \text{ с}^{-1}.$$

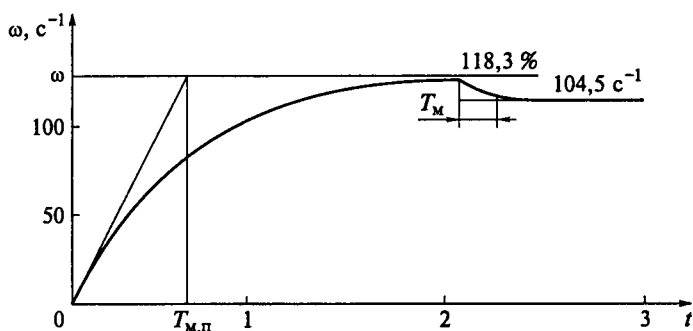


Рис. 8.4. Характеристики переходных процессов при пуске и приложении нагрузки

14. По формуле (8.13) с учетом того, что $\omega_{\text{нач}} = \omega_0$, построим характеристику переходного процесса при приложении нагрузки

$$\omega = 104,5 - (104,5 - 118,3)e^{-4,55t}.$$

Характеристики переходных процессов показаны на рис. 8.4.

8.3. Переходные процессы в электроприводе постоянного тока

Рассмотрим динамические характеристики электропривода постоянного тока по системе «тиристорный преобразователь — двигатель постоянного тока (ТП—Д)». Тиристорный преобразователь будем рассматривать как безынерционное звено с постоянным передаточным коэффициентом $k_{\text{п}}$.

Электромеханические процессы при постоянном потоке возбуждения описываются следующей системой уравнений (см. подразд. 5.1):

$$\begin{aligned} U_{\text{я}} &= C\omega + I_{\text{я}}R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt}; \\ M &= CI_{\text{я}}; \\ M - M_{\text{с}} &= J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \end{aligned} \quad (8.15)$$

где C — машинная постоянная при неизменном потоке возбуждения, $C = k\Phi$.

Электромагнитная и механическая инерционности двигателя характеризуются соответственно электромагнитной $T_{\text{я}}$ и электро-

механической T_m постоянными времени. Для двигателя постоянного тока

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}; \quad (8.16)$$

$$T_m = \frac{J_{\Sigma}}{\beta} = \frac{J_{\Sigma} R_{\text{я}}}{C^2}. \quad (8.17)$$

Решив уравнения (8.15) с учетом (8.16) и (8.17), получим

$$T_m T_{\text{я}} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{\text{уст}}, \quad (8.18)$$

где $\omega_{\text{уст}} = \frac{U_{\text{я}}}{C} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{с}}}{C^2}$.

Уравнение (8.18) является общим для двигателей с линейной механической характеристикой, вид которой определяется ее жесткостью β .

Перейдя к операторной форме записи, получим исходную для построения структурной схемы систему уравнений:

$$\begin{aligned} U_{\text{я}} &= C\omega + I_{\text{я}} R_{\text{я}} (T_{\text{я}} p + 1); \\ M &= C I_{\text{я}}; \\ M - M_{\text{с}} &= \frac{C^2}{R_{\text{я}}} T_m p \omega. \end{aligned} \quad (8.19)$$

На основании этой системы уравнений построена структурная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения, состоящая из четырех типовых динамических звеньев (рис. 8.5).

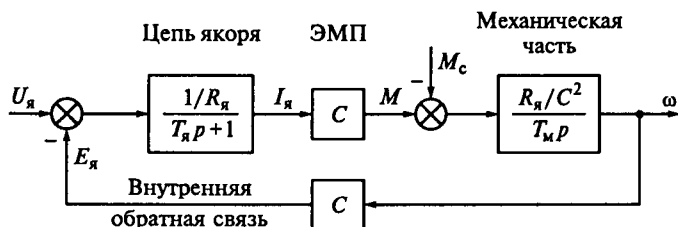


Рис. 8.5. Структурная схема двигателя постоянного тока при постоянном потоке возбуждения:

ЭМП — электромагнитический преобразователь

Механическая часть двигателя характеризуется интегрирующим звеном с постоянной времени T_m , которая зависит от суммы момента инерции якоря двигателя и моментов инерции всех движущихся частей рабочей машины, приведенных к валу двигателя. Электромеханическое преобразование энергии отражается пропорциональным звеном с коэффициентом передачи C , который показывает, что момент двигателя пропорционален току якоря. Электрическая цепь якоря двигателя представляет собой инерционное звено с постоянной времени T_a . Это звено характеризует, как изменяется ток якоря при изменении величины $(U_a - E_a)$. ЭДС якоря $E_a = k\Phi\omega$ отражается в виде отрицательной обратной связи. Такая связь является внутренней, так как она соответствует природе физических процессов в описываемом объекте, а не является частью системы регулирования.

При регулировании скорости изменением напряжения якоря передаточная функция двигателя по управляющему воздействию:

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{U_a(p)} = \frac{1/C}{T_m T_a p^2 + T_m p + 1}. \quad (8.20)$$

Характер переходных процессов определяется видом корней характеристического уравнения (см. (8.18))

$$T_m T_a p^2 + T_m p + 1 = 0. \quad (8.21)$$

Корни этого уравнения

$$p_{1,2} = \frac{-T_m \pm \sqrt{T_m^2 - 4T_m T_a}}{2T_m T_a}.$$

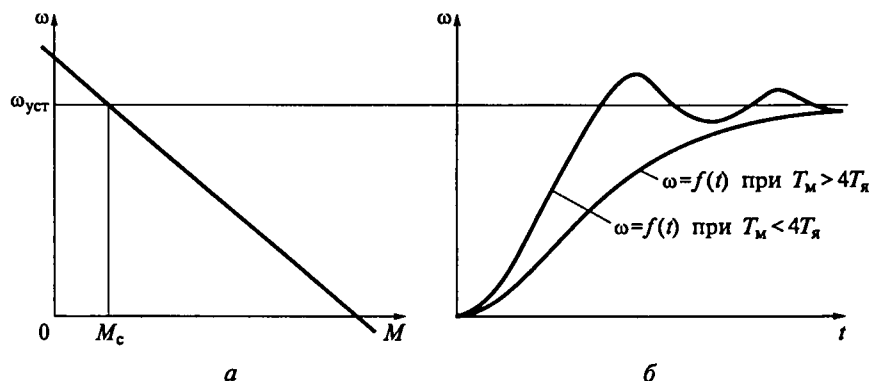


Рис. 8.6. Переходные характеристики при пуске электропривода:

a — линейная механическая; b — переходная

Если $T_m > 4T_{я}$, то корни будут вещественными и отрицательными. В этом случае решение уравнения (8.18) имеет вид

$$\omega = \omega_{уст} + C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t}. \quad (8.22)$$

Переходный процесс в этом случае будет носить монотонный характер с изменением скорости по закону, соответствующему инерционному звену второго порядка (рис. 8.6).

Если $T_m > 4T_{я}$, то корни будут комплексными сопряженными с отрицательной вещественной частью:

$$p_{1,2} = \alpha \pm j\Omega,$$

где

$$\alpha = -\frac{1}{2T_{я}}; \quad \Omega = \frac{\sqrt{\frac{4T_{я}}{T_m} - 1}}{2T_{я}}. \quad (8.23)$$

Решив дифференциальное уравнение (8.18), получим

$$\omega = \omega_{уст} + (C_1 \cos \Omega t + C_2 \sin \Omega t) e^{\alpha t}. \quad (8.24)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 находят из начальных или конечных условий переходного процесса.

Переходный процесс, описываемый уравнением (8.24), характеризуется периодическими колебаниями с частотой Ω и затухающей амплитудой. Время переходного процесса ориентировочно может быть оценено, как $t_{п.п} = (6 \dots 10) T_{я}$. Колебательность процесса связана с тем, что происходит периодическое преобразование кинетической энергии в электромагнитную, и наоборот.

Формула для расчета переходной характеристики для $I_{я} = f(t)$ может быть получена из уравнения движения

$$I_{я} = \frac{M_c}{C} + \frac{J_{\Sigma}}{C} \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (8.25)$$

т.е. ток является суммой двух составляющих: статического тока $I_c = M_c/C$ и динамического тока $I_{дин}$, который пропорционален ускорению.

Передаточную функцию для тока при управляющем воздействии найдем из структурной схемы на рис. 8.5:

$$W(p) = \frac{J_{\Sigma}}{U_{я} \rightarrow I_{я}} \frac{p}{T_m T_{я} p^2 + T_m p + 1} + I_c(p). \quad (8.26)$$

На рис. 8.7 показаны переходные характеристики скорости и тока при пуске двигателя до достижения скорости $\omega_{уст} = U_{я}/C - \Delta\omega_c$ при

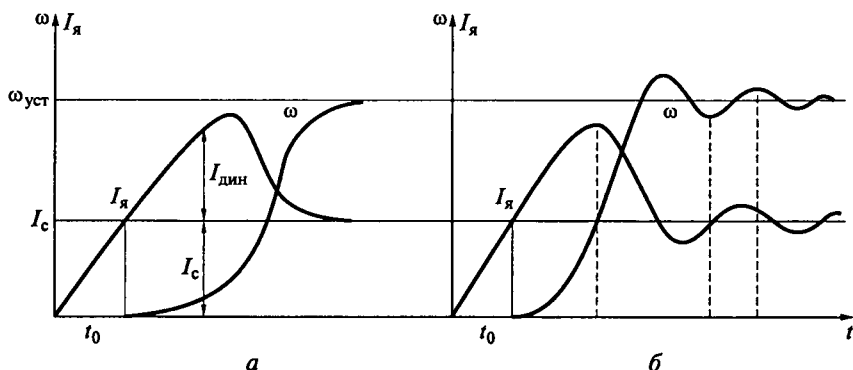


Рис. 8.7. Переходные характеристики для тока и скорости:

a — $T_m > 4T_я$; *б* — $T_m < 4T_я$

наличии на валу двигателя реактивного статического момента. Будем полагать, что в рассматриваемом случае $T_m > 4T_я$. В течение времени t_0 (рис. 8.7, *a*) ток якоря нарастает до $I_c = M_c/C$ по экспоненциальному закону $i_c = \frac{U_я}{R_я}(1 - e^{-t/T_я})$. Когда ток становится равным статическому, начинается движение вала двигателя. Динамический ток возрастает, вследствие чего растет ускорение двигателя. Затем под действием увеличивающейся противоЭДС якоря ток начинает спадать и скорость двигателя асимптотически приближается к установившемуся значению.

Если $T_m < 4T_я$, то в кривых тока и скорости появляется колебательная составляющая (рис. 8.7, *б*).

Если $T_m < 4T_я$, то в кривых тока и скорости появляется колебательная составляющая (рис. 8.7, *б*).

Рассмотрим динамические процессы при приложении нагрузки к валу двигателя при постоянном напряжении, подводимом к якорной цепи двигателя. Для анализа переходных процессов по управляющему воздействию, когда изменяется $U_я$, удобно пользоваться схемой на рис. 8.5. В нашем случае задание скорости остается постоянным, а изменяется момент нагрузки M_c . Для удобства

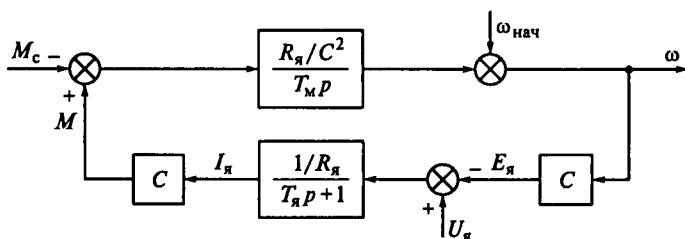


Рис. 8.8. Структурная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения при приложении возмущения по нагрузке

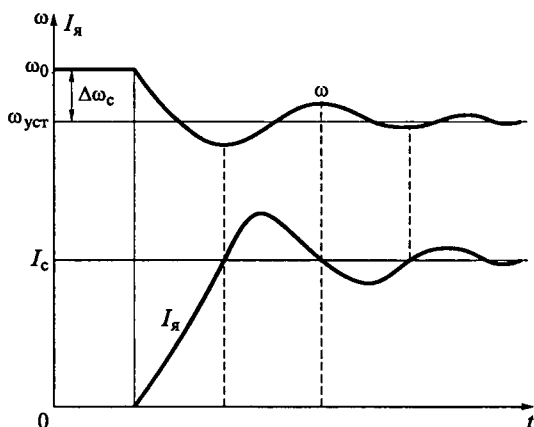


Рис. 8.9. Переходные характеристики тока и скорости при приложении нагрузки

анализа процессов и нахождения передаточной функции электропривода по возмущающему воздействию преобразуем структурную схему так, чтобы входным воздействием являлся статический момент M_c , а выходным параметром — скорость ω . Структурная схема для этого случая показана на рис. 8.8. Примем, что двигатель работал вхолостую при $M_c = 0$ со скоростью $\omega_0 = U_{\text{я}}/C$, ток якоря $I_{\text{я}} = 0$ и приложенное напряжение уравнивалось ЭДС якоря $U_{\text{я}} = E_{\text{я}}$.

Если к валу двигателя скачком приложить нагрузку — статический момент $M_c = CI_c$, то скорость двигателя начнет снижаться, ЭДС якоря будет уменьшаться и в цепи якоря начнет нарастать ток (рис. 8.9):

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{я}} - C\omega - L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt}}{R_{\text{я}}}.$$

Если индуктивность якорной цепи велика (постоянная времени $T_{\text{я}} > \frac{1}{4} T_{\text{м}}$), то скорость нарастания тока будет отставать от темпа снижения скорости и к моменту, когда скорость снизится до нового установившегося значения $\omega_{\text{уст}} = \omega_0 - \Delta\omega_c = \omega_0 - M_c/\beta$, ток якоря еще не достигнет величины I_c , при которой момент двигателя был бы равен моменту сопротивления M_c . Поэтому скорость будет продолжать падать до тех пор, пока ток якоря не станет равным статическому, затем скорость начнет возрастать и после ряда колебаний достигнет установившегося значения. Обратим внимание, что кривые $\omega = f(t)$ и $I_{\text{я}} = f(t)$ взаимосвязаны: точкам

максимума и минимума скорости, когда $d\omega/dt = 0$, соответствует момент пересечения кривой тока линии статического тока.

Если индуктивность якорной цепи невелика $\left(T_{\text{я}} > \frac{1}{4} T_{\text{м}}\right)$, то процесс снижения скорости при приложении нагрузки будет иметь монотонный характер.

При постоянном $U_{\text{я}}$ передаточная функция электропривода по возмущающему воздействию будет такой:

$$W(p) = - \frac{\frac{R_{\text{я}}}{C^2 T_{\text{м}} p}}{\frac{R_{\text{я}} C C}{C^2 T_{\text{м}} p R_{\text{я}} (T_{\text{я}} p + 1)} + 1}. \quad (8.27)$$

Выполнив преобразования, получим

$$W(p) = - \frac{1}{\beta} \frac{T_{\text{я}} p + 1}{T_{\text{м}} T_{\text{я}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1}, \quad (8.28)$$

где $\beta = C^2/R_{\text{я}}$ — жесткость механической характеристики электропривода.

Из выражения (8.28) следует, что при приложении нагрузки $M_{\text{с}}$ скорость двигателя снизится на величину $\Delta\omega_{\text{с}}$. По окончании переходного процесса ($p = 0$) установившаяся статическая ошибка

$$\Delta\omega_{\text{с}} = \frac{M_{\text{с}}}{\beta},$$

т. е. установившееся снижение скорости (статическая ошибка $\Delta\omega_{\text{с}}$), прямо пропорциональна приложенному моменту и обратно пропорциональна жесткости механической характеристики электропривода.

Как отмечено в гл. 4, для повышения точности регулирования скорости применяют замкнутые системы регулирования с обрат-

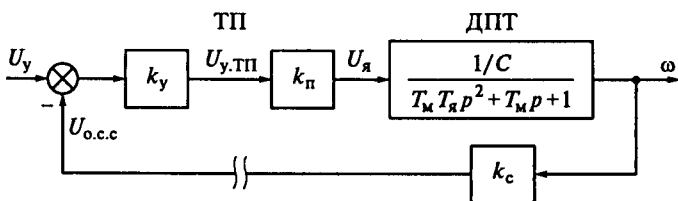


Рис. 8.10. Структурная схема электропривода ТП—Д с замкнутой по скорости системой управления:

ТП — тиристорный преобразователь; ДПТ — двигатель постоянного тока

ной связью по скорости. Структурная схема электропривода по системе ТП—Д с обратной связью по скорости представлена на рис. 8.10. Тиристорный преобразователь будем рассматривать как безынерционное звено с передаточным коэффициентом k_{π} . Передаточная функция по управляющему воздействию, составленная по схеме рис. 8.10, следующая:

$$W(p) = \frac{k_y k_{\pi} \frac{1}{C(T_m T_{\pi} p^2 + T_m p + 1)}}{\frac{k_y k_{\pi} k_c}{C(T_m T_{\pi} p^2 + T_m p + 1)} + 1},$$

где k_y — коэффициент усиления усилителя; k_c — коэффициент обратной связи по скорости; U_y — напряжение управления.

Обозначив $(k_y k_{\pi} k_c)/C = K$, где K — коэффициент усиления разомкнутой системы (при разрыве обратной связи по скорости), после преобразований получим

$$W(p) = \frac{K}{k_c (K + 1)} \frac{1}{\frac{T_m}{K + 1} T_{\pi} p^2 + \frac{T_m}{K + 1} p + 1}. \quad (8.29)$$

Из выражения для передаточной функции (8.29) видно, что в замкнутой по скорости системе регулирования электромеханическая постоянная времени T_m , характеризующая инерционность механической части электропривода, уменьшается в $(K + 1)$ раз по сравнению с T_m в разомкнутой системе регулирования. Это связано с тем, что жесткость механических характеристик β в замкнутой системе увеличивается в $(K + 1)$ раз (см. гл. 4).

Это важное свойство — повышение быстродействия привода благодаря отрицательной обратной связи по скорости — сопряжено с существенным недостатком — возрастанием колебательности переходных процессов.

Обычно электромеханическая постоянная времени $T_m > 4 T_{\pi}$ и в разомкнутой системе регулирования скорости во время переходных процессов колебания не наблюдаются. Введение отрицательной обратной связи по скорости уменьшает эквивалентную электромеханическую постоянную времени $T_{м.э.кв.}$, причем чем больше коэффициент обратной связи k_c , тем меньше $T_{м.э.кв.}$. Поэтому в замкнутых по скорости системах регулирования $T_{м.э.кв.} < 4 T_{\pi}$ и переходные процессы в электроприводе приобретают колебательный характер. Для снижения колебательности в систему регулирования вводят корректирующие звенья. Способы формирования переходных процессов требуемого характера будут рассмотрены в гл. 9.

В общем случае можно предложить приведенный ниже порядок анализа переходных процессов в системах электропривода, если эти процессы описываются линейными (или линеаризованными) дифференциальными уравнениями:

1) определяют, какие инерционности следует учитывать при анализе данного переходного процесса;

2) находят постоянные времени, характеризующие каждую инерционность. Если постоянные времени отличаются на два порядка и более, то меньшими постоянными времени в инженерных расчетах, как правило, можно пренебречь;

3) число инерционностей определяет порядок дифференциального уравнения, описывающего переходный процесс;

4) находят характеристическое уравнение, соответствующее левой части однородного линейного дифференциального уравнения, описывающего исследуемый переходный процесс (см., например, (8.18)).

Переходный процесс в случае линейных зависимостей переменных и скачкообразного (единичного) характера управляющего или возмущающего воздействия будет описываться уравнением $x = f(t)$, где x — исследуемый параметр электропривода (ток, момент, скорость).

Пример 8.2. Определить, какими будут переходные процессы в электроприводе ТП—Д с разомкнутой и замкнутой по скорости системами регулирования.

Технические данные приводного двигателя постоянного тока: номинальное напряжение якоря $U_{я.н} = 220$ В; сопротивление якорной цепи $R_{я} = 0,6$ Ом; индуктивность обмотки якоря $L_{я} = 0,02$ Гн; машинная постоянная $C = 1,9$ В·с; номинальная скорость $\omega_n = 104,5$ с⁻¹. Момент инерции привода $J_{\Sigma} = 1,0$ кг·м².

Напряжение управления U_y изменяется от 0 до 10 В; напряжение тиристорного преобразователя $U_{ТП}$ от 0 до 300 В пропорционально напряжению $U_{y.ТП}$, подаваемому на систему управления тиристорного преобразователя и изменяющемуся от 0 до 30 В; коэффициент обратной связи по скорости $k_c = 0,09$ В·с.

Решение. 1. Электромагнитная постоянная времени якорной цепи

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}} = \frac{0,02}{0,6} = 0,033 \text{ с.}$$

2. Электромеханическая постоянная времени

$$T_{м} = \frac{J_{\Sigma} R_{я}}{C^2} = \frac{1 \cdot 0,6}{1,9^2} = 0,16 \text{ с.}$$

3. Коэффициент усиления усилителя в разомкнутой системе

$$k_{y,p} = \frac{U_{я.н}}{U_{ТП}} \frac{U_{y,ТП}}{U_y} = \frac{220 \cdot 30}{300 \cdot 10} = 2,2 \text{ с.}$$

4. Напряжение управления ТП, соответствующее $U_{ТП} = U_{я.н} = 220 \text{ В}$ (см. рис. 8.10),

$$U_{y,ТП} = U_y k_{y,p} = 10 \cdot 2,2 = 22 \text{ В.}$$

5. Коэффициент усиления ТП

$$k_n = \frac{U_{я.н}}{U_{y,ТП}} = \frac{220}{22} = 10.$$

6. Коэффициент усиления усилителя $k_{y,з}$ в замкнутой системе регулирования найдем из соотношения

$$U_{y,ТП} = (U_y - U_{о.с.с}) k_{y,з},$$

где $U_{о.с.с}$ — напряжение обратной связи по скорости, откуда

$$k_{y,з} = \frac{U_{y,ТП}}{U_y - k_c \omega_n} = \frac{22}{10 - 0,09 \cdot 104,5} = 36,6.$$

7. Коэффициент усиления разомкнутой системы

$$K = \frac{k_{y,з} k_n k_c}{C} = \frac{36,6 \cdot 10 \cdot 0,09}{1,9} = 17,3.$$

8. Эквивалентная электромеханическая постоянная времени в замкнутой по скорости системе

$$T_{м.э.кв} = \frac{T_m}{K + 1} = \frac{0,16}{17,3 + 1} = 0,009 \text{ с.}$$

9. В разомкнутой системе регулирования $T_m > 4T_n$, так как $0,16 > (4 \cdot 0,033)$. Это означает, что переходный процесс монотонный и носит апериодический характер.

В замкнутой по скорости системе регулирования $T_{м.э.кв} < 4T_n$, так как $0,009 < (4 \cdot 0,033)$. Это означает, что переходный процесс носит колебательный характер с затуханием.

Контрольные вопросы

1. В каком случае возникают переходные процессы в электроприводе?
2. Каким уравнением описывается процесс изменения тока в обмотке возбуждения двигателя после ее подключения к источнику питания?
3. Как уменьшить время нарастания постоянного тока в активно-индуктивной нагрузке после подачи на нее напряжения?

4. От каких параметров зависит электромеханическая постоянная времени?

5. От каких параметров зависит электромагнитная постоянная времени якорной цепи двигателя постоянного тока?

6. Каким типовым динамическим звеном описывается механическая часть электропривода?

7. От чего зависят переходные процессы в электромеханической системе, которая имеет механическую и электромагнитную инерционности?

8. Как по передаточной функции электропривода при возмущающем воздействии определить установившуюся ошибку по скорости при приложении статического момента?

9. Почему при приложении нагрузки к валу двигателя постоянного тока увеличивается ток якоря?

10. Из каких динамических звеньев состоит структурная схема двигателя постоянного тока?

11. Каким должно быть соотношение между электромеханической и электромагнитной постоянными времени, чтобы переходный процесс носил апериодический характер?

12. Какое влияние на характер переходных процессов в электроприводе оказывает отрицательная обратная связь по скорости?

9.1. Виды электрической защиты

Асинхронные двигатели напряжением до 1000 В необходимо защищать от межфазных и однофазных коротких замыканий, от перегрузок, возможного произвольного повторного включения после исчезновения напряжения, превышения температуры обмоток по сравнению с допустимой.

Максимально-токовую защиту от коротких замыканий осуществляют чаще всего посредством автоматических выключателей с максимально-токовыми расцепителями или посредством плавких предохранителей.

Номинальный ток автомата выбирают равным номинальному току двигателя $I_{н.дв}$ или больше него.

Ток срабатывания максимального расцепителя автомата обычно составляет $10 \dots 12 I_{н.дв}$.

Это позволяет исключить ложные срабатывания защиты при пуске асинхронных короткозамкнутых двигателей, когда пусковой ток достигает $(5,5 \dots 7,0) I_{н.дв}$. Для асинхронных двигателей с фазным ротором, где нет столь больших пусковых токов, максимально-токовую защиту обычно настраивают на ток срабатывания, равный $3 I_{н.дв}$.

Защиту от перегрузок двигателей выполняют с помощью тепловых расцепителей автоматов, тепловых реле магнитных пускателей или плавких предохранителей. Аппараты защиты от перегрузок имеют характеристику тока срабатывания, зависящую от времени перегрузки.

При длительной перегрузке ток срабатывания должен быть равным $(1,2 \dots 1,4) I_{н.дв}$.

Такая защита исключает недопустимый нагрев двигателя при перегрузках вследствие нарушения технологического режима или работы трехфазного двигателя на двух фазах.

Нулевая защита или защита минимального напряжения должна предотвратить самопроизвольное включение двигателя после кратковременного исчезновения или глубокого снижения напряжения. Аппаратом для защиты минимального напряжения служит пускатель или контактор, который отключается при снижении

напряжения меньше $0,6U_n$ (U_n — номинальное напряжение). При восстановлении напряжения включение контактора не происходит, так как нормально открытый блок-контакт, шунтирующий кнопку «Пуск», будет отключен. Для включения двигателя оператор должен будет вновь нажать кнопку «Пуск».

В последние годы все большее применение находит температурная защита двигателей. В обмотки двигателя встраивают датчик температуры (чаще всего терморезистор), который дает сигнал на отключение двигателя, если температура его обмоток достигла опасного значения.

Применение температурной защиты асинхронных двигателей особенно необходимо, если регулирование скорости асинхронного двигателя связано с регулированием напряжения его питания.

В синхронных электроприводах применяют следующие виды защиты: максимально-токовую защиту от коротких замыканий в силовой цепи; нулевую защиту, если по технологии работы отдельно не оговаривается режим самозапуска при кратковременном исчезновении напряжения питания; минимально-токовую защиту в цепи обмотки возбуждения, защищающую синхронный двигатель от продолжительной работы в асинхронном режиме; защиту от длительного пуска, реализуемую с помощью реле времени пуска.

Выдержку времени этого реле выбирают исходя из времени, в течение которого синхронный двигатель может работать в асинхронном режиме по условиям нагрева пусковой обмотки до достижения максимально допустимой температуры. Если двигатель за это время не вышел на рабочую характеристику синхронного режима, то пуск должен быть прекращен, а двигатель отключен от сети питания.

В электроприводах постоянного тока применяют следующие виды защиты:

- нулевую защиту, предотвращающую самозапуск электропривода при кратковременных исчезновениях напряжения питания;
- максимально-токовую защиту от коротких замыканий в силовой цепи;
- максимально-токовую защиту, ограничивающую ток якоря до предельно допустимого значения по условиям коммутации щеточно-коллекторного узла; эту защиту в замкнутых системах регулирования выполняют с помощью схем токоограничения;
- минимально-токовую защиту с помощью реле минимального тока в цепи обмотки независимого возбуждения; это реле отключает электропривод, предотвращая работу двигателя с недопустимо высокими скоростями, которые может развить двигатель с сильно ослабленным потоком возбуждения при небольших нагрузках на валу.

9.2. Релейно-контакторное управление электроприводами

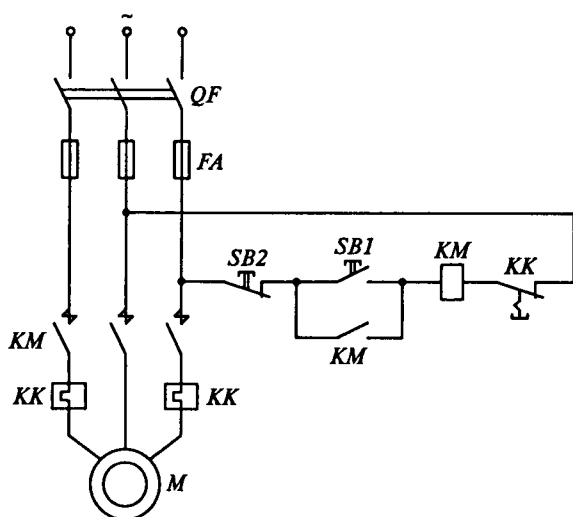
Электроприводы с питанием электродвигателей непосредственно от сети, работающие в разомкнутых системах регулирования, широко распространены во всех отраслях промышленности. Преимущественно это асинхронные электроприводы с двигателями с короткозамкнутым или фазным ротором. В таких системах применяют контактные или бесконтактные переключающие электрические аппараты релейного действия. Для включения и отключения силовых цепей используют электромагнитные контакторы или тиристорные коммутаторы. Последние целесообразно применять при большой частоте циклов включения-отключения двигателя.

Логические функции управления электроприводом в соответствии с технологическим процессом реализуют с помощью электромагнитных и других типов реле, контакты которых рассчитаны на ток не более 5 А. В современных системах электропривода с дискретным управлением часто логические функции реализуют на программируемых контроллерах с выходом на катушки контакторов.

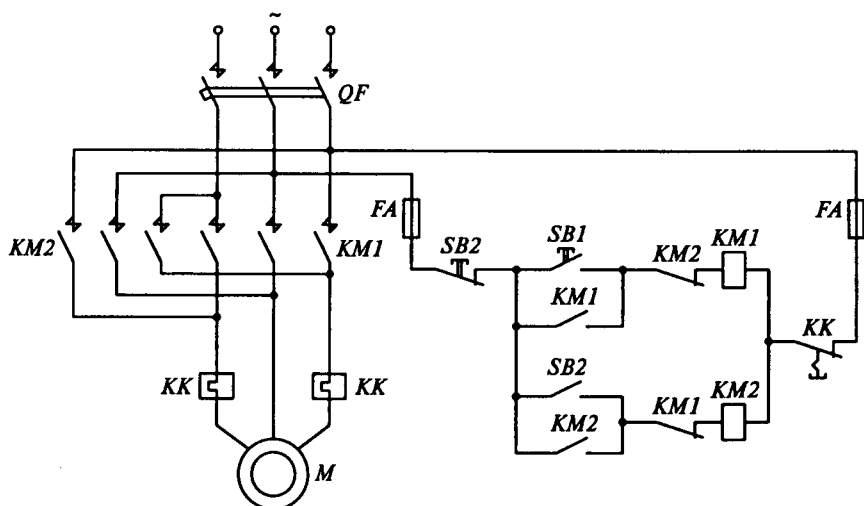
Типовые схемы нерегулируемого асинхронного привода с нереверсивным и реверсивным магнитным пускателем представлены на рис. 9.1.

Для пуска двигателя с нереверсивным пускателем (рис. 9.1, *а*) нужно включить выключатель *QF* и нажать кнопку пуска *SB1*, в результате чего подается питание на катушку контактора *KM*, который своими главными контактами подключает обмотки статора двигателя к сети. Блок-контакт контактора *KM* шунтирует кнопку пуска *SB1* так, что после ее отпускания контактор *KM* остается включенным. Для отключения двигателя нужно нажать кнопку *SB2*, после чего контактор *KM* отключается. Защита от коротких замыканий в схеме на рис. 9.1, *а* осуществляется плавкими предохранителями *FA*, а в схеме на рис. 9.1, *б* — автоматическим выключателем *QF* и предохранителями *FA*. Защита двигателя от токов перегрузки выполняется тепловым реле *KK*, разрывающим при срабатывании цепь катушки контактора. Возврат теплового реле после срабатывания в исходное положение осуществляется нажатием на нем кнопки. Защита от самопроизвольного включения двигателя после исчезновения (снижения) напряжения питания реализуется блок-контактом контактора *KM*, шунтирующим кнопку *SB1*.

В реверсивном пускателе (см. рис. 9.1, *б*) имеются два контактора *KM1* и *KM2*, подключающие обмотки статора к сети с разным порядком чередования фаз. Для предотвращения одновременного включения двух контакторов, что приведет к короткому замыканию, предусмотрены механическая и электрическая бло-



a



b

Рис. 9.1. Принципиальная схема управления асинхронным двигателем посредством магнитного пускателя:
a — нереверсивного; б — реверсивного

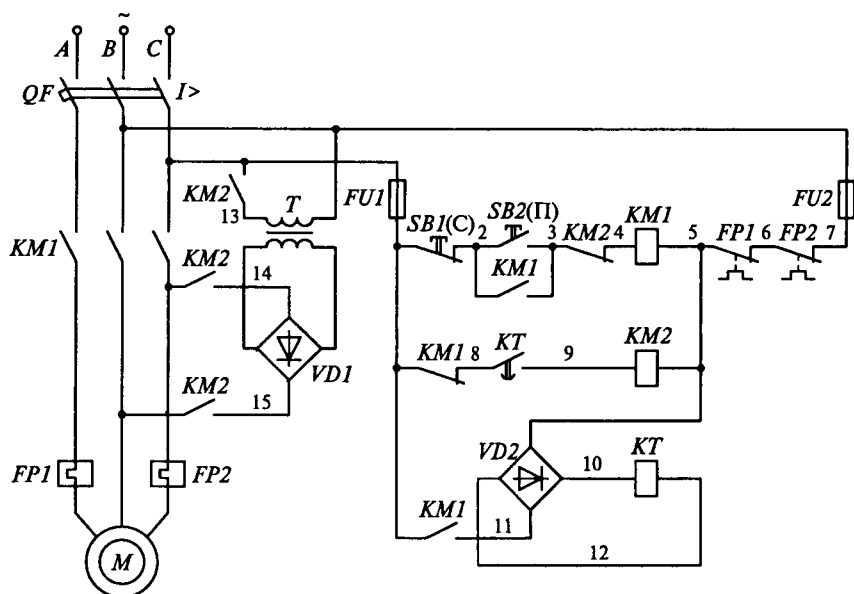


Рис. 9.2. Принципиальная схема нереверсивного асинхронного электропривода с динамическим торможением

кировки (введением нормально закрытых блок-контактов в цепи катушки другого контактора).

В соответствии с некоторыми технологиями требуется, чтобы процесс останова электропривода протекал интенсивнее, чем под действием статического момента. В этом случае в схемах управления используют различные виды электрического торможения — динамическое торможение и торможение противовключением, а также механическое торможение с помощью электромагнитных тормозов.

На рис. 9.2 приведена принципиальная схема нереверсивного электропривода, которая позволяет проводить пуск и останов электродвигателя с динамическим торможением [12].

Питание на схему подается автоматическим выключателем *QF*, напряжение переменного тока на обмотку статора — линейным контактором *KM1*, напряжение постоянного тока — контактором динамического торможения *KM2*. Источник постоянного тока содержит трансформатор *T* и выпрямитель *VD1*, подключаемые к сети контактором *KM2* только в режиме торможения.

Команда на пуск подается кнопкой *SB2(П)*. При ее нажатии включается контактор *KM1*, и двигатель подключается к сети. Для останова двигателя нажимают кнопку *SB1(С)*, контактор *KM1* отключается и отключает двигатель от сети переменного тока. Одновременно нормально закрытым блок-контактом контактора *KM1*

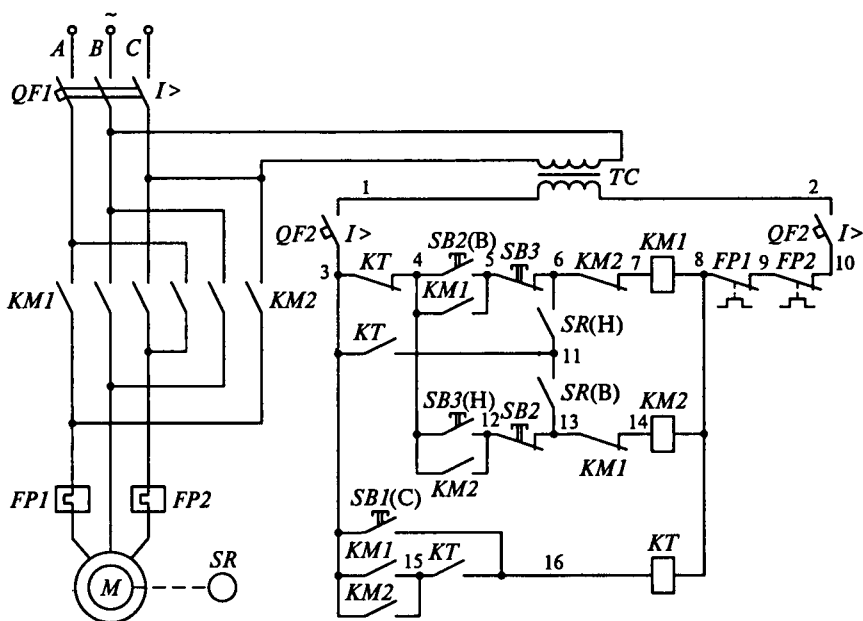


Рис. 9.3. Принципиальная схема реверсивного асинхронного электропривода с торможением противовключением

включается контактор $KM2$, подающий в обмотки статора двигателя постоянный ток. Двигатель переходит в режим динамического торможения. Длительность подачи постоянного тока в обмотки статора контролируется реле времени KT . После отключения реле времени KT его контакт в цепи катушки контактора $KM2$ по прошествии выдержки времени размыкается.

В схеме рис. 9.2 применены нулевая, максимально-токовая и тепловая защиты, осуществляемые соответственно линейным контактором $KM1$, автоматическим выключателем QF с максимально-токовым расцепителем и тепловыми реле $FP1$ и $FP2$. Цепи управления защищены предохранителями $FU1$ и $FU2$. При срабатывании любой из защит отключается линейный контактор $KM1$. Используемая в схеме блокировка нормально замкнутыми блок-контактами контакторов $KM1$ и $KM2$ предотвращает одновременное включение контакторов $KM1$ и $KM2$.

Когда по условиям технологического процесса необходимо значительно ускорить процесс торможения, применяют торможение противовключением. Схема реверсивного асинхронного электропривода, в которой реализуется торможение противовключением, приведена на рис. 9.3. Исходя из условий эксплуатации электропривода цепи управления питаются пониженным напряжением от трансформатора TC [12].

Схема на рис. 9.3 позволяет осуществлять прямой пуск, реверс и останов электропривода торможением противовключением с контролем по скорости. При этом в качестве чувствительного элемента используется электромеханическое реле контроля скорости SR , устанавливаемое на валу электродвигателя. Оно замыкает свои контакты $SR(B)$ или $SR(H)$ при скорости $\omega_{SR} \approx 0,01\omega_{н.дв.}$

Управляющие команды подаются в схему кнопками управления $SB2(B)$ («Вперед»), $SB3(H)$ («Назад») и $SB1(C)$ («Стоп») в зависимости от требуемого по технологии направления вращения. Напряжение на обмотку статора подается контакторами $KM1$ и $KM2$. Кнопка останова электропривода $SB1(C)$ включена в цепь катушки реле KT , которое осуществляет режим торможения противовключением при любом направлении вращения. В цепях катушек контакторов $KM1$ и $KM2$ находятся блокировочные контакторы кнопок $SB3$, $SB2$ и контакторы $KM2$ и $KM1$, предотвращающие одновременное включение этих контакторов.

Управление электроприводом осуществляется следующим образом. При нажатии кнопки $SB2(B)$ образуется цепь питания катушки контактора $KM1$, который срабатывает и подключает статорную обмотку асинхронного электродвигателя к питающей сети.

При разгоне электродвигателя срабатывает реле контроля скорости и замыкает свой контакт $SR(B)$, подготавливая схему к останову электропривода, если будет нажата кнопка $SB1(C)$ («Стоп»).

Для реверсирования электропривода нужно нажать кнопку $SB3(H)$. После этого размыкается блокирующий контакт $SB3$ в цепи катушки $KM1$. Контактор $KM1$ отключает статор двигателя от сети питания. Одновременно в цепи катушки $KM2$ замыкается блокирующий контакт $KM1$. Катушка контактора $KM2$ получает питание, и контактор $KM2$ подключает статорную обмотку к сети питания, изменяя чередование фаз. Магнитное поле электродвигателя начинает вращаться в противоположном направлении, а ротор по инерции вращается в прежнем направлении. Поэтому асинхронный двигатель переходит в режим торможения противовключением до полного останова, а затем разгоняется в направлении «Назад». При разгоне в направлении «Назад» реле контроля скорости замыкает свой контакт $SR(H)$, подготавливая схему к останову. Для останова привода при нажатии кнопки $SB1(C)$ катушка реле торможения KT получает питание, и реле KT включается. Контактор $KM2$ теряет питание и отключает статорную обмотку двигателя от сети питания. При этом контактор $KM2$ замыкает свой блокировочный контакт в цепи катушки контактора $KM1$. Контактор $KM1$ включается. Статорная обмотка подключается с прямым чередованием фаз «Вперед», а ротор вращается по инерции в направлении «Назад». Поэтому асинхронный двигатель пе-

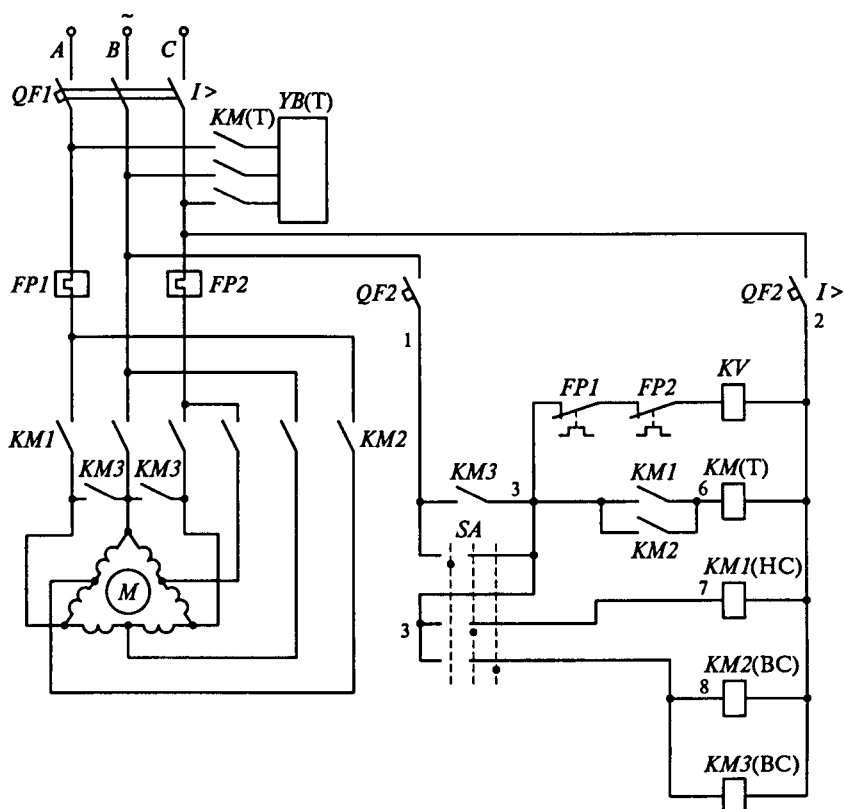


Рис. 9.4. Принципиальная схема управления двухскоростным асинхронным двигателем

переходит в режим торможения противовключением. Когда скорость снижается практически до нуля, реле контроля скорости SR размыкает свой контакт $SR(H)$ и катушка контактора $KM1$ отключается от питания, а контактор $KM1$ отключает статорную обмотку от сети питания.

В технологических установках иногда применяют электроприводы с двухскоростными асинхронными электродвигателями, у которых ступенчатое регулирование скорости достигается за счет изменения числа пар полюсов путем изменения схемы включения специально выполненной статорной обмотки (см. подразд. 3.2.8).

На рис. 9.4 приведена схема управления двухскоростным асинхронным двигателем. В схеме предусмотрено переключение статорной обмотки с «треугольника» на «двойную звезду». Такую схему применяют в электроприводах механизмов, если по технологии требуется регулирование скорости с постоянной мощностью на рабочем органе.

Команды управления подаются трехпозиционным командоконтроллером *SM* [1]. В исходном положении, когда включены автоматические выключатели *QF1* и *QF2* и командоконтроллер находится в нулевом (левом) положении, включается реле напряжения *KV* и своим блок-контактом реле *KV* становится на самопитание, обеспечивая нулевую защиту электропривода.

При переключении командоконтроллера в первое положение, соответствующее низкой скорости (НС), получает питание катушка контактора *KM1*(НС), контактор срабатывает, замыкает блок-контакт в цепи катушки тормозного контактора *KM*(Т) и подключает статорную обмотку, включенную в треугольник, к сети. В то же время тормозной контактор *KM*(Т) срабатывает и подает питание на электромагнит тормоза *YB*(Т), при этом тормоз растормаживается (поднимаются колодки) и электродвигатель развивает низкую скорость.

При переключении командоконтроллера во второе положение, соответствующее высокой скорости (ВС), катушка контактора *KM1* отключает статорную обмотку от сети. Катушки контакторов *KM2* и *KM3* получают питание, и контакторы срабатывают. Контактор *KM3*, замыкая свои контакты, образует нулевую точку «двойной звезды». Контактор *KM2* замыкает свой контакт в цепи катушки тормозного контактора *KM*(Т), контактор *KM*(Т) срабатывает или остается включенным. Одновременно контактор *KM2* подключает «двойную звезду» статорной обмотки к сети, и двигатель развивает высокую скорость. Чтобы остановить электропривод, необходимо переключить командоконтроллер в нулевое положение. В этом случае контакторы теряют питание, статорная обмотка отключается от сети и контакты *KM*(Т) оказываются разомкнутыми. Контактор *KM*(Т) отключает питание с катушки электромагнитного тормоза, и тормозные колодки накладываются на тормозной барабан. Электропривод останавливается под действием момента сопротивления нагрузки и механического тормоза.

Схемы управления асинхронным двигателем с фазным ротором кроме аппаратов управления статорными цепями двигателя включают в себя аппаратуру для управления схемой пуска асинхронного двигателя. На рис. 9.5 показана схема панели типа ПДУ6220, которая обеспечивает пуск асинхронного фазного двигателя в две ступени и динамическое торможение [11]. Защита двигателя осуществляется автоматическими выключателями *QF1* (рис. 9.5, *а*), *QF2* с элементами токовой защиты *FA1...FA3* и тепловым реле *КК*.

Управление двигателем осуществляет оператор посредством командоконтроллера *SA* (рис. 9.5, *б*). Начальное положение командоконтроллера — нулевое. При переводе рукоятки, например в третье положение, включается контактор *KM2*, осуществляющий подключение к сети обмотки статора, и контроллер *KM5*,

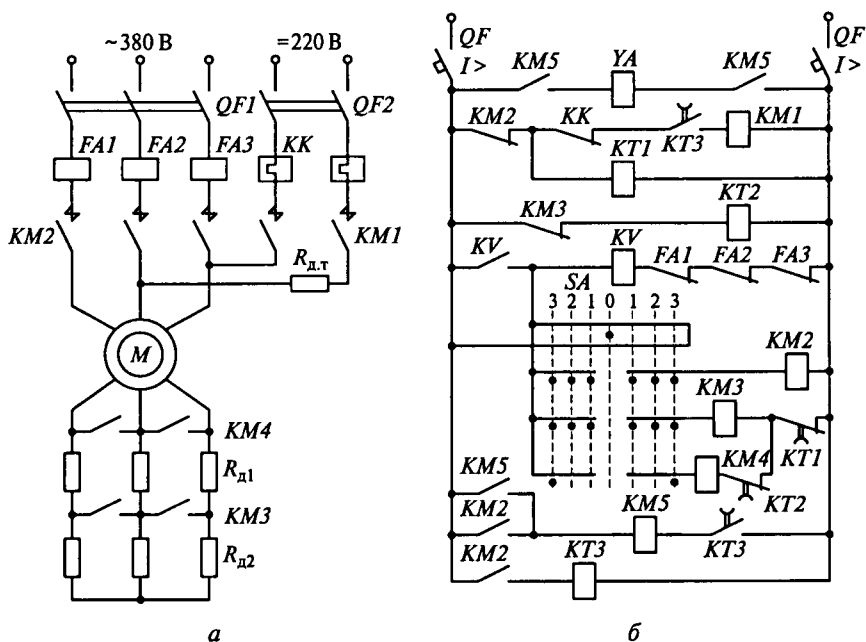


Рис. 9.5. Принципиальная схема панели управления асинхронным двигателем ПДУ6220:

а — силовые цепи; *б* — цепи управления

включающий электромагнитный тормоз *УА*. Двигатель начинает разгоняться при полном пусковом сопротивлении в цепи ротора. В данной схеме принята двухступенчатая схема реостатного пуска. Переключение ступеней роторного сопротивления производится автоматически в функции времени.

После включения линейного контактора *КМ2* отключается катушка реле времени *КТ1* и с выдержкой времени включается контактор *КМ3*, закорачивающий часть пускового резистора в цепи ротора двигателя.

При включении контактора *КМ3* разрывается цепь реле времени *КТ2*, которое с выдержкой времени включает контактор *КМ4*, полностью закорачивающий пусковой резистор. Пуск заканчивается.

Для торможения двигателя рукоятку командоконтроллера переводят в нулевое положение, контактор *КМ2* отключается, и включается контактор *КМ1*, подающий в обмотки статора постоянный ток. Начинается динамическое торможение двигателя. Длительность динамического торможения определяется реле времени *КТ3*, которое, потеряв питание, отключает контактор динамического торможения *КМ1* и контактор механического тормоза.

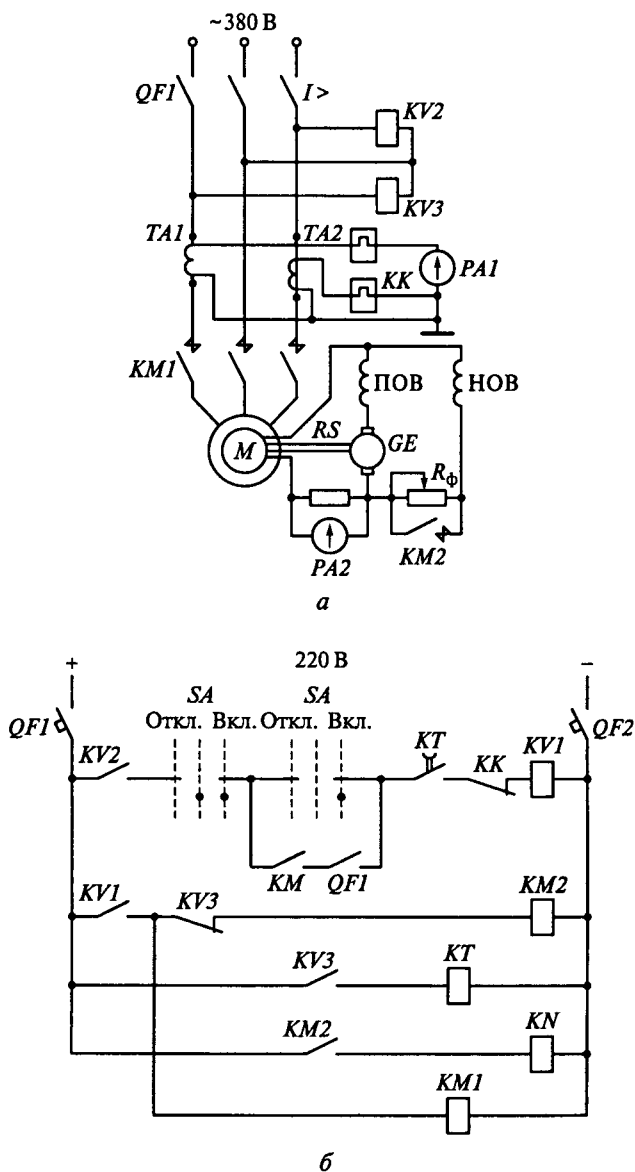


Рис. 9.6. Принципиальная схема панели управления ПУ7502:
а — силовые цепи; б — цепи управления

Релейно-контакторные схемы управления синхронными двигателями кроме включения и отключения двигателя управляют цепью возбуждения двигателя. На рис. 9.6 показана принципиальная схема панели управления синхронным двигателем с глухо

подключенным возбудителем — генератором постоянного тока *GE*, расположенным на одном валу с синхронным двигателем. Генератор *GE* имеет две обмотки возбуждения: последовательную ПОВ и независимую НОВ.

Пуск синхронного двигателя *M* (рис. 9.6, *a*) осуществляется переводом рукоятки переключателя *SA* (рис. 9.6, *б*) в положение «Вкл.». Реле *KV2*, *KV3* контролируют наличие напряжения в цепи переменного тока. Если напряжение есть, срабатывает реле *KV1*, которое включает линейный контактор *KM1*. Начинается асинхронный пуск синхронного двигателя. Напряжение на возбудителе — генераторе *GE* с самовозбуждением — возрастает, и по достижении подсинхронной скорости двигатель *M* втягивается в синхронизм.

При снижении в сети напряжения на 15...20 % реле *KV3* отключается и замыкает свой нормально замкнутый контакт в цепи контактора *KM2*, который своим главным контактом шунтирует резистор форсировки возбуждения R_{ϕ} , вследствие чего возрастают напряжение и ток возбуждения синхронного двигателя. Это позволяет предотвратить выход двигателя из синхронизма при резком снижении напряжения сети.

Если напряжение в сети длительное время не восстанавливается, реле времени *KT* (см. рис. 9.6, *б*) отключает двигатель.

Релейно-контакторное управление двигателями постоянного тока независимого возбуждения в настоящее время не применяют. Эти двигатели управляются полупроводниковыми управляемыми выпрямителями (см. подразд. 5.2...5.4).

9.3. Принципы построения систем регулирования электроприводов

В современных автоматизированных регулируемых электроприводах плавное регулирование скорости, положения, момента в заданных диапазонах достигается посредством регулирования параметров электроэнергии (величины тока, напряжения, частоты), подводимой к обмоткам двигателя.

Регулирование величины тока, напряжения и частоты осуществляется полупроводниковыми преобразователями электроэнергии (управляемыми выпрямителями, преобразователями частоты) с помощью электронных регуляторов или микропроцессорных устройств.

В зависимости от назначения и технических требований, предъявляемых к электроприводу, различают два типа систем регулирования:

- разомкнутые системы регулирования;
- замкнутые системы регулирования.

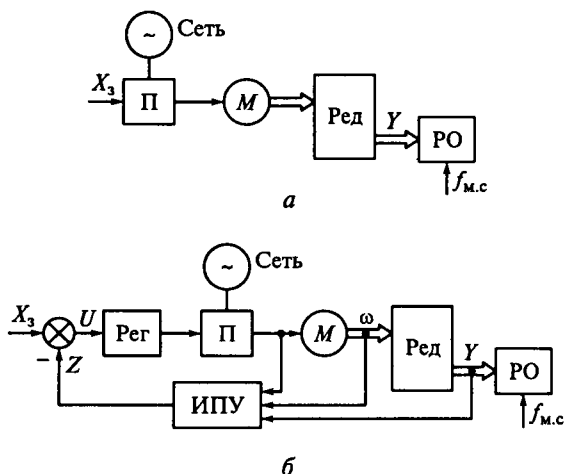


Рис. 9.7. Функциональная схема систем управления электроприводом: *а* — разомкнутой; *б* — замкнутой; П — управляемый преобразователь; М — двигатель; Ред — редуктор; РО — рабочий орган; Рег — регулятор; ИПУ — информационно-преобразовательное устройство; $f_{м.с}$ — возмущение по моменту сопротивления на валу двигателя

Разомкнутой системой регулирования электропривода называют систему, в которой отсутствует обратная связь по выходной регулируемой координате (рис. 9.7, *а*). В такой системе фактическое значение регулируемой координаты Y существенно зависит от возмущений $f_{м.с}$, действующих на узлы системы и рабочий орган (РО), так как сигнал управления $U = X_3$ (X_3 — сигнал задания) не зависит от отклонения регулируемой координаты от заданного значения.

Основным видом возмущающего воздействия является изменение момента сопротивления на рабочем органе машины. Возмущающие воздействия могут быть и другие, например изменение напряжения питающей сети.

Замкнутой системой регулируемого электропривода называют систему, в которой имеется обратная связь по выходной координате (рис. 9.7, *б*).

В замкнутой системе регулирования сигнал управления U формируется из сигнала задания X_3 и сигнала отрицательной обратной связи Z , несущего информацию о фактическом значении регулируемого параметра Y , которое зависит от возмущений, действующих на узлы системы и рабочий орган электропривода. В результате введения обратной связи ошибка регулирования уменьшается до допустимого значения. Сигнал управления U системы электропривода с обратной связью представляет собой отклонение (ошибку) регулирования относительно сигнала задания X_3 . При

этом ни одно из возмущений не измеряется, а их влияние на регулируемый параметр воспринимается системой по каналу обратной связи. Следовательно, в системах с отрицательной обратной связью по выходному параметру реализуется управление по отклонению.

Обратная связь представляет собой канал передачи и преобразования информации с выхода системы регулирования или ее узлов на вход в целях формирования результирующего сигнала управления.

Сигнал управления

$$U = X_3 \pm Z.$$

В зависимости от знака сигнала Z обратная связь бывает положительной или отрицательной. Если сигнал обратной связи Z суммируется с сигналом задания X_3 , то обратную связь называют положительной. Если сигнал обратной связи Z вычитается из сигнала X_3 , то обратную связь называют отрицательной.

По характеру действия обратные связи подразделяют на жесткие, гибкие и нелинейные с зоной нечувствительности (связи с отсечкой).

Если обратная связь действует только во время переходных процессов, то такую обратную связь называют гибкой. Если обратная связь начинает действовать только с определенного уровня регулируемого параметра Y , то такую обратную связь называют задержанной, или обратной связью с отсечкой.

Жесткие обратные связи и обратные связи с отсечкой используют в первую очередь для формирования статических характеристик электропривода. Кроме того, жесткие и особенно гибкие обратные связи применяют для обеспечения устойчивости системы регулирования и получения желаемых динамических показателей, характеризующих протекание переходных процессов при воздействии на систему сигналов задания X_3 и возмущений $f_{м.с.}$.

В замкнутых системах регулирования электроприводов почти всегда используется отрицательная обратная связь по скорости как главная обратная связь по контролируемому параметру. В подразд. 4.2 и 8.3 подробно были рассмотрены назначение, принцип действия и влияние этой обратной связи на статические и динамические характеристики электропривода.

Ранее было показано, что отрицательная обратная связь по скорости повышает жесткость механических характеристик электропривода, увеличивает точность регулирования, повышает быстродействие при отработке управляющих воздействий и возмущений по нагрузке, но в то же время увеличивает колебательность переходных процессов.

9.4. Классификация замкнутых систем регулирования

Замкнутые системы электропривода классифицируются по следующим признакам: принципу действия, выходному регулирующему параметру и выполняемым функциям.

Классификация по принципу действия. По принципу действия системы регулирования автоматизированных электроприводов классифицируют следующим образом:

- системы с непрерывным управлением;
- системы с релейным управлением;
- системы с импульсным управлением;
- системы с цифровым (например, микропроцессорным) управлением.

Системы регулирования электропривода с непрерывным управлением — это такие системы, в которых каждая из переменных (координат) непрерывно изменяется во времени или остается постоянной. Соответственно непрерывно измеряется и подается в систему управления информация о контролируемых величинах, в соответствии с которой осуществляется непрерывное воздействие на приводной двигатель. Функциональная схема этой системы такая, как на рис. 9.7, б.

Системы электропривода с релейным управлением — это системы, у которых в прямом канале регулирования для управления электродвигателем имеется силовой релейный элемент с двумя устойчивыми состояниями:

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

$$U_{\text{вых}} = 0 \text{ (или } U_{\text{вых}} = -U_{\text{п}}), \text{ если } U_{\text{вх}} < 0,$$

где $U_{\text{п}}$ — напряжение питания электродвигателя.

Регулировочная характеристика релейного элемента приведена на рис. 9.8.

Функциональная схема замкнутой системы электропривода с релейным управлением приведена на рис. 9.9.

Системы электропривода с импульсным управлением — это системы, в прямой цепи регулирования которых имеется импульсный элемент, преобразующий непрерывный сигнал в непрерывную последовательность импульсов с определенными характеристиками. Наиболее распространен в системах электропривода широтно-импульсный преобразователь (ШИМ), который формирует последовательность импульсов с переменной длительностью и с постоянными периодом и амплитудой.

Цифровые системы регулирования — это такие системы, в которых информация о переменных преобразуется в цифровой код.

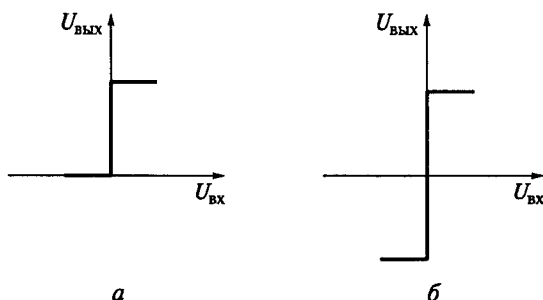


Рис. 9.8. Регулировочная характеристика идеального релейного элемента:
 a — однополярного; $б$ — двухполярного

В настоящее время цифровые системы создают на базе микропроцессоров, реализующих в цифровой форме функции регулятора (Рег) и информационно-преобразовательного устройства (ИПУ).

Классификация по выходным регулируемым координатам. По типу выходной регулируемой координаты замкнутые системы электропривода подразделяются на три группы:

1) системы регулирования момента (силы). К ним относятся, например, электроприводы систем натяжения металла в листопрокатном производстве в металлургии или системы натяжения пленки в химико-технологическом производстве тонких пленок. Закон регулирования момента (силы) рабочего органа определяется технологическим процессом;

2) системы регулирования скорости. Они используются в электроприводах многих технологических машин: металлообрабатывающих станках, прокатных станах и др.

Системы регулирования скорости подразделяют на две группы: системы стабилизации скорости, у которых скорость поддерживается постоянной несмотря на воздействие возмущений. К ним относятся, например, электроприводы бумагоделательных машин;

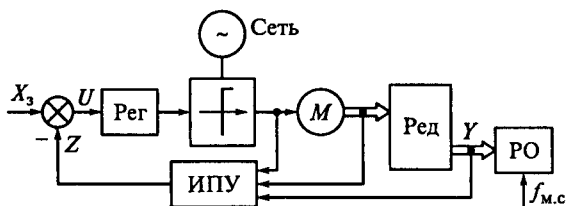


Рис. 9.9. Функциональная схема замкнутой системы электропривода с релейным управлением:

X_3 — сигнал задания; Z — сигнал обратной связи; Рег — регулятор; M — двигатель; Ред — редуктор; РО — рабочий орган; ИПУ — информационно-преобразовательное устройство; $f_{м.с}$ — возмущение по моменту сопротивления на валу двигателя

системы управления скоростью, у которых скорость рабочего органа регулируется с высокой точностью в широких пределах в соответствии с требуемым характером протекания технологического процесса. Это, например, электроприводы экскаваторов, подъемно-транспортных машин и др.;

3) системы регулирования положения рабочего органа. Эти системы используют в электроприводах нажимных винтов прокатных станов, в роботах и манипуляторах и многих других промышленных установках. В этих системах положение рабочего органа регулируется с заданной точностью в соответствии с требованиями технологического процесса.

Существуют два типа замкнутых систем регулирования положения рабочего органа:

системы позиционирования, в которых задаются исходное и конечное положения рабочего органа, а параметры перемещения не контролируются;

следящие системы. Это системы регулирования положения, в которых задается и непрерывно обрабатывается с заданной точностью вся траектория движения рабочего органа.

Классификация замкнутых систем электропривода по выполняемым функциям осуществляется в соответствии с особенностями технологического процесса. Все замкнутые системы электропривода подразделяют на пять групп:

1) системы стабилизации регулируемого параметра (момента, скорости и т.п.). Основная их особенность — постоянство сигнала задания регулируемого параметра в течение продолжительного времени. Фактическое значение регулируемого параметра должно оставаться постоянным, несмотря на воздействие возмущений;

2) системы регулирования скорости, в которых задание скорости определяется оператором и обрабатывается электроприводом с требуемой точностью;

3) следящие системы электропривода. Это замкнутые системы регулирования положения в соответствии с произвольно изменяющимся входным сигналом управления, обеспечивающим воспроизведение рабочим органом движения объекта слежения. Следящие системы применяют в электроприводах копировально-фрезерных станков, в системах наведения радиолокационных станций, которые работают в режиме слежения за летящими и одновременно маневрирующими объектами, и др.;

4) системы с программным управлением. Это системы, в которых при выполнении технологического процесса сигнал задания и регулируемые величины изменяются по заданному закону с помощью программного устройства. Системы электропривода с числовым программным управлением находят применение в приводах металлорежущих станков;

5) адаптивные системы, в которых автоматически осуществляется перенастройка параметров или структуры регуляторов таким образом, чтобы обеспечить оптимальную работу системы регулирования при существенных изменениях параметров объекта регулирования или внешних условий.

Системы регулирования электроприводов различают в зависимости от рода тока:

1) постоянного тока:

с суммирующим усилителем;

с подчиненным регулированием параметров электропривода;

2) переменного тока:

системы параметрического управления;

частотно-токовые системы управления;

системы векторного управления.

9.5. Регуляторы

Электрический силовой канал регулируемых электроприводов состоит из двигателя и полупроводникового преобразователя, с которого питание поступает на двигатель. Регулирование развиваемого двигателем момента и его скорости осуществляется изменением параметров преобразованной электрической энергии: напряжения, тока, частоты. В гл. 5 и 6 были рассмотрены основные системы регулируемого электропривода постоянного и переменного тока. Для управления электроприводами используют регуляторы тока, скорости, положения и другие регуляторы, вырабатывающие сигналы управления преобразователем и обеспечивающие заданное изменение контролируемых параметров в установившихся и переходных режимах.

Существует много разновидностей управляющих устройств, в том числе регуляторов. Можно выделить две основные группы: аналоговые устройства регулирования и дискретные, или цифровые, устройства. Находят также применение цифроаналоговые системы регуляторов.

Цифровые системы регулирования в настоящее время выполняют на базе микропроцессорной техники. Здесь рассмотрены регуляторы для аналоговых систем регулирования электроприводов. Это электронные усилители, реализующие требуемую по условиям регулирования передаточную функцию

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)},$$

где $U_{\text{вых}}$ — выходной аналоговый сигнал регулятора; $U_{\text{вх}}$ — входной аналоговый сигнал регулятора.

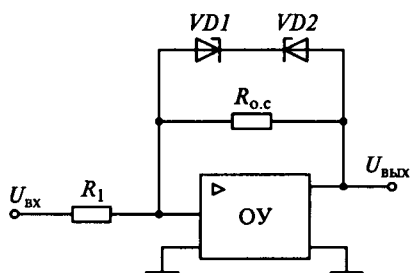


Рис. 9.10. Схема ограничения выходного напряжения регулятора

В соответствии с передаточной функцией регулятора будет происходить изменение во времени выходного сигнала регулятора. Переходная характеристика регулятора — это зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = f(t)$ при подаче на его вход ступенчатого единичного сигнала $U_{\text{ВХ}} = 1$.

Промышленностью выпускается унифицированная блочная система регуляторов аналогового действия УБСР-АИ, построенная на интегральных микросхемах. В ее состав входят унифицированные регуляторы. В системе УБСР-АИ принят унифицированный электрический аналоговый сигнал: $0 \dots \pm 10$ В и $0 \dots \pm 5$ мА.

Основу аналогового регулятора составляет операционный усилитель, выполненный на базе микросхем серий К140УД и К533УД.

Операционный усилитель — это усилитель постоянного тока с высоким коэффициентом усиления в разомкнутом состоянии. Для реализации требуемой передаточной функции операционный усилитель охватывается обратной связью, состоящей из активно-емкостных сопротивлений. Передаточная функция усилителя определяется соотношением сопротивления обратной связи $Z_{\text{о.с}}$ и входного сопротивления $Z_{\text{ВХ}}$:

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{Z_{\text{о.с}}(p)}{Z_{\text{ВХ}}(p)}. \quad (9.1)$$

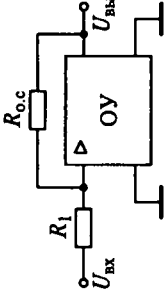
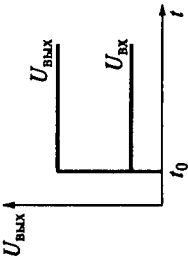
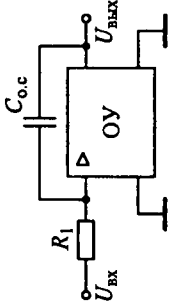
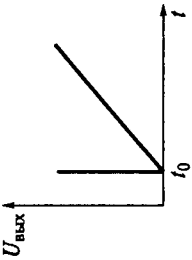
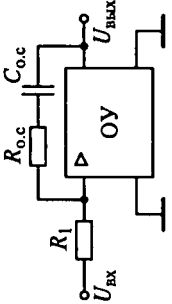
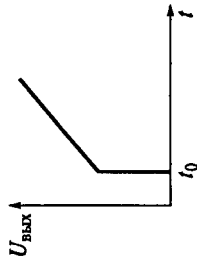
В аналоговых системах регулирования электропривода применяются главным образом пропорциональные (П-регуляторы), интегральные (И-регуляторы), пропорционально-интегральные (ПИ-регуляторы) и пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы (ПИД-регуляторы).

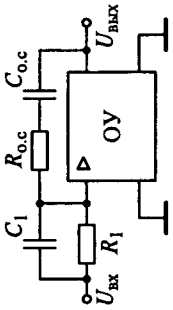
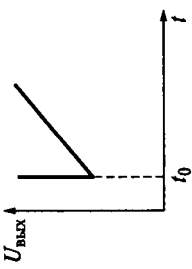
В табл. 9.1 приведены схемы, передаточные функции и переходные характеристики указанных типов регуляторов.

Необходимыми элементами регуляторов являются устройства, ограничивающие выходное напряжение регулятора на заданном уровне. Одна из схем ограничения показана на рис. 9.10.

Ограничение выходного сигнала осуществляется с помощью стабилитронов $VD1$, $VD2$, включенных параллельно операционному усилителю (ОУ). Когда выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ становится равным напряжению пробоя стабилитрона, дальнейшее увеличение $U_{\text{ВЫХ}}$ становится невозможным, и оно остается на этом уровне.

Таблица 9.1. Типы аналоговых регуляторов

Тип регулятора	Схема	Передаточная функция	Параметры регулятора	Переходная функция
П		$W(p) = k$	$k = \frac{R_{o.c.}}{R_1}$	
И		$W(p) = \frac{1}{Tp}$	$T = R_1 C_{o.c.}$	
ПИ		$W(p) = k + \frac{1}{Tp}$	$k = \frac{R_{o.c.}}{R_1};$ $T = R_{o.c.} C_{o.c.}$	

Тип регулятора	Схема	Передаточная функция	Параметры регулятора	Переходная функция
ПИД		$W(p) = k + T_1 p + \frac{1}{T_2 p}$	$k = \frac{R_{0,с}}{R_1};$ $T_1 = R_1 C_1;$ $T_2 = R_{0,с} C_{0,с}$	

Обозначения: $R_{0,с}C_{0,с}$ — соответственно сопротивление и емкость в цепи обратной связи; ОУ — операционный усилитель; T , T_1 , T_2 — постоянные времени; t_0 — время приложения единичного воздействия; R_1 — входное сопротивление.

9.6. Система регулирования электропривода постоянного тока с суммирующим усилителем

Функциональная схема электропривода постоянного тока по системе ТП—Д с обратной связью по скорости приведена на рис. 9.11. Уравнение механических характеристик этой системы в соответствии с (5.13) следующее:

$$\omega = \omega_{0\text{замк}} - \frac{M}{\beta_{\text{замк}}} = \frac{U_d}{C} - \frac{M}{\beta_{\text{замк}}}, \quad (9.2)$$

где $\omega_{0\text{замк}}$ — скорость холостого хода в замкнутой системе регулирования; $\beta_{\text{замк}}$ — абсолютная жесткость механических характеристик в замкнутой системе управления; U_d — ЭДС преобразователя, питающего якорную цепь двигателя.

Как было показано в подразд. 4.2, в системах управления с отрицательной обратной связью по скорости жесткость механических характеристик $\beta_{\text{замк}}$ увеличивается по сравнению с жесткостью характеристик в разомкнутой системе в $(1 + K)$ раз, где K — коэффициент усиления разомкнутой системы. Для рассматриваемой схемы

$$K = \frac{k_y k_{\pi} k_c}{C}. \quad (9.3)$$

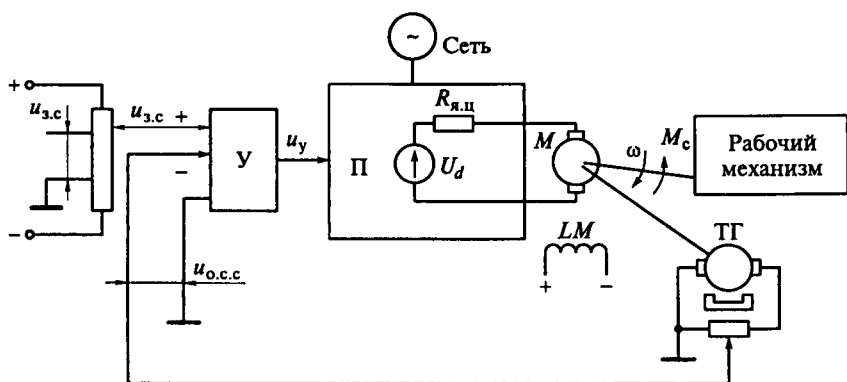


Рис. 9.11. Функциональная схема системы ТП—Д с отрицательной обратной связью по скорости:

У — усилитель; П — преобразователь; $u_{з.с}$ — сигнал задания скорости; $R_{я.ц}$ — сопротивление якорной цепи двигателя; М — двигатель; LM — обмотка возбуждения; ТГ — тахогенератор; $u_{о.с.с}$ — сигнал обратной связи по скорости; u_y — напряжение управления преобразователем

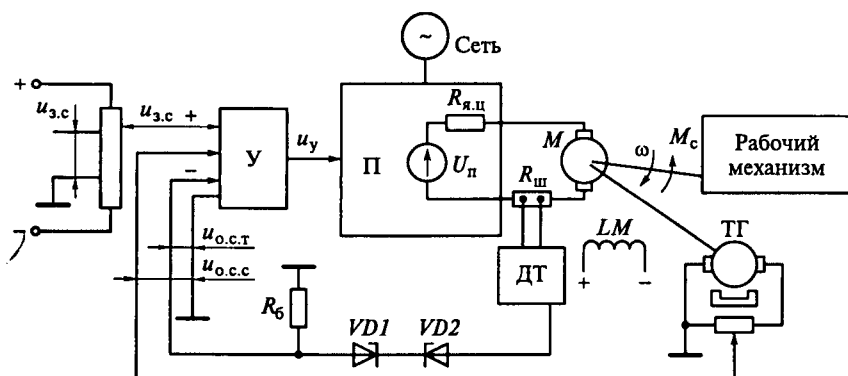


Рис. 9.12. Функциональная схема системы ТП—Д с отрицательной обратной связью по скорости и токовой отсечкой:

$R_{ш}$ — сопротивление шунта; R_6 — балластное сопротивление; ДТ — датчик тока; ТГ — тахогенератор

Здесь k_y — коэффициент усиления усилителя; $k_{п} = E_d/u_y$ — коэффициент усиления преобразователя, где E_d , u_y — соответственно ЭДС и напряжение управления преобразователя; $k_c = u_{o.c.c}/\omega$ — коэффициент обратной связи по скорости, где $u_{o.c.c}$ — напряжение обратной связи по скорости; $C = k\Phi$ — машинная постоянная, где k — конструктивный коэффициент.

Электропривод с рассматриваемой схемой управления описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} u_y &= u_{3.c} - u_{o.c.c} = u_{3.c} - k_c \omega, \\ U_d &= k_y k_{п} u_y, \\ U_d &= C \omega + I_{я} R_{я.ц}, \\ M &= C I_{я}, \end{aligned} \quad (9.4)$$

где $u_{3.c}$ — сигнал задания скорости.

Решив эти уравнения совместно, получим уравнение механической характеристики привода в замкнутой системе:

$$\omega = \frac{k_y k_{п} u_{3.c}}{k_c (1 + K)} - \frac{M}{\beta (1 + K)}. \quad (9.5)$$

Действие отрицательной обратной связи по скорости в замкнутой по скорости системе управления поясняется на рис. 4.5. Из (9.5) следует, что для увеличения жесткости механических характеристик нужно увеличивать коэффициент усиления K , что может достигаться увеличением коэффициента усилителя k_y .

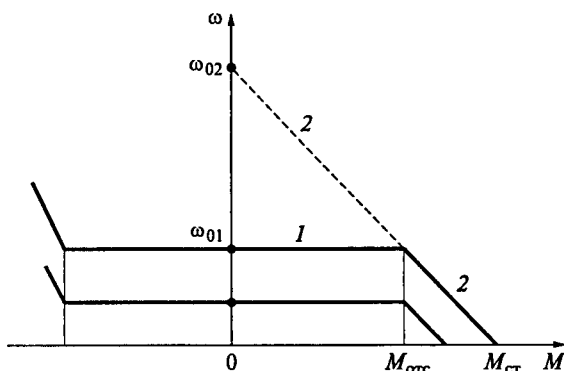


Рис. 9.13. Механические характеристики системы ТП—Д с отрицательной обратной связью по скорости и токовой отсечкой:

1 — рабочий участок; 2 — участок ограничения момента; $M_{отс}$ — момент включения отсечки; $M_{ст}$ — момент стопорения; ω_{01} , ω_{02} — скорость идеального холостого хода соответственно участков 1 и 2

Обычно по условиям эксплуатации технологических установок и условиям коммутации на коллекторе двигателя необходимо ограничивать максимальный момент, развиваемый двигателем, на уровне $(2 \dots 3)M_H$. С этой целью в замкнутых системах электропривода применяется задержанная отрицательная обратная связь по току якоря, называемая токовой отсечкой. Функциональная схема электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по скорости и токовой отсечкой приведена на рис. 9.12. Токовая отсечка в этой схеме реализована на стабилитронах $VD1$ и $VD2$. Уравнения цепи обратной связи по току следующие:

$$u_{о.с.т} = 0, \text{ или } |I_{я}| \leq I_{отс};$$

$$u_{о.с.т} = (|I_{я}| - I_{отс})k_t, \text{ или } |I_{я}| > I_{отс},$$

где $I_{отс}$ — ток якоря, при превышении которого вступает в действие отрицательная обратная связь по току (ток отсечки); $u_{о.с.т}$ — сигнал (напряжение) отрицательной обратной связи по току; k_t — коэффициент обратной связи по току.

В результате совместного действия отрицательных обратных связей по скорости и току формируется механическая характеристика (рис. 9.13), которая состоит из двух участков: рабочего (1) с высокой жесткостью и участка (2) ограничения момента. На рабочем участке, пока не действует отрицательная обратная связь по току, механические характеристики описываются уравнением (9.5). При $I_{я} > I_{отс}$ работа электропривода может быть описана следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
u_y &= u_{3.c} - u_{o.c.c} - u_{o.c.T} = u_{3.c} - k_c \omega - (I_{я} - I_{отс}) k_T; \\
E_d &= k_y k_{п} u_y; \\
E_d &= C \omega + I_{я} R_{я.ц}; \\
M &= C I_{я}.
\end{aligned} \tag{9.6}$$

Решив совместно эти уравнения относительно ω , получим уравнение механической характеристики для участка 2:

$$\omega = \frac{k_y k_{п} u_{3.c}}{C(1+K)} + \frac{k_y k_{п} k_T M_{отс}}{C^2(1+K)} - \frac{R_{я.ц} + k_y k_{п} k_T}{1+K} \frac{M}{C^2}. \tag{9.7}$$

Первые два слагаемых уравнения (9.7) определяют скорость ω_{02} идеального холостого хода механической характеристики для участка 2:

$$\omega_{02} = \omega_{01} + \Delta \omega_{02},$$

где ω_{01} — скорость идеального холостого хода для участка 1 характеристики (см. рис. 9.13).

На участке 2 жесткость механической характеристики

$$\beta_{замк2} = \frac{C^2(1+K)}{R_{я.ц} + k_y k_{п} k_T}.$$

ЭДС преобразователя U_d при работе двигателя с замкнутой системой управления не остается постоянной:

$$U_d = C \omega + \frac{R_{я.ц}}{C} M.$$

На рабочем участке механической характеристики скорость примерно постоянна. С увеличением нагрузки на валу двигателя U_d возрастает. После перехода на участок 2 и дальнейшего повышения нагрузки скорость снижается до нуля, наступает режим стопорения и U_d уменьшается до величины

$$U_d = \frac{M_{ст} R_{я.ц}}{C},$$

где $M_{ст}$ — момент стопорения.

Таким образом, для формирования требуемой механической характеристики преобразователь должен иметь необходимый запас по величине E_d в соответствии с соотношением

$$U_{d \max} = C \omega_n + I_{отс} R_{я.ц},$$

где ω_n — номинальная скорость двигателя.

В этом случае жесткость верхней механической характеристики $\beta_{\text{замк1}}$ будет постоянной при всех нагрузках вплоть до достижения момента начала действия отсечки

$$M_{\text{отс}} = CI_{\text{отс}}.$$

9.7. Многоконтурные системы с подчиненным регулированием координат электропривода

Для решения задач синтеза замкнутых систем электропривода, обладающих хорошим быстродействием и требуемым характером переходных процессов, разработан инженерный метод синтеза, называемый методом последовательной коррекции с подчиненным регулированием параметров (сокращенно метод подчиненного регулирования).

После формирования требуемых статических характеристик в электроприводе с системой регулирования с суммирующим усилителем может оказаться, что его динамические характеристики (поведение системы в переходных режимах) будут неприемлемы: будут велики колебательность, перерегулирование, недостаточно быстродействие. В этом случае необходимо введение в систему регулирования корректирующих устройств и (или) гибких обратных связей, действующих только во время переходных процессов. Методы коррекции динамических характеристик в схемах с суммирующим усилителем рассмотрены, например, в учебнике [15].

Поскольку наладка систем с суммирующим усилителем сложна, их в настоящее время применяют только для электроприводов, к диапазону и качеству регулирования которых предъявляют невысокие требования. Вместо систем с суммирующим усилителем применяют системы подчиненного регулирования параметров электроприводов. Принцип подчиненного регулирования состоит в том, что для каждой из регулируемых переменных — тока, скорости и, если нужно, положения, — организуют свой контур регулирования, содержащий объект регулирования, регулятор и отрицательную обратную связь по регулируемой координате. Регуляторы контуров соединяют последовательно, причем выходной сигнал регулятора внешнего контура является заданием для внутреннего контура. В системах электропривода внутренним контуром является контур тока. Задание на ток вырабатывается регулятором скорости.

В системе привода ТП—Д объект регулирования в контуре тока состоит из двух звеньев: тиристорного преобразователя ТП и цепи якоря двигателя постоянного тока (см. рис. 8.10).

Строго говоря, тиристорный преобразователь нельзя рассматривать как пропорциональное звено с передаточной функцией $K_{\text{ТП}}$. По принципу работы он является дискретным элементом. Воздей-

ствие на управляемый преобразователь осуществляется импульсно, подачей отпирающего импульса на управляющий электрод тиристора. После включения очередного тиристора воздействие на преобразователь возможно только спустя некоторое время, когда система импульсно-фазового управления подаст импульс на отпирание очередного тиристора. Поэтому тиристорный преобразователь следует рассматривать как динамическое звено с запаздыванием или приблизительно как апериодическое звено с постоянной времени T_μ , равной среднему значению запаздывания.

Передаточная функция тиристорного преобразователя

$$W_{\text{ТП}}(p) = \frac{K_{\text{ТП}}}{T_\mu p + 1}. \quad (9.8)$$

Принимают $T_\mu = 0,0034 \dots 0,01$ с.

Полупроводниковые преобразователи с широтно-импульсным управлением также удобно представлять в виде апериодического звена с постоянной времени

$$T_{\text{ТП}} = \frac{1}{f},$$

где f — несущая частота ШИР-преобразователя. Эти преобразователи обладают высоким быстродействием, так как несущая частота обычно составляет несколько кГц.

Якорная цепь двигателя описывается апериодическим звеном с «большой» постоянной времени T_α (см. (8.16)):

$$W_\alpha(p) = \frac{1/R_\alpha}{T_\alpha p + 1}. \quad (9.9)$$

Расчетная структурная схема контура тока представлена на рис. 9.14.

Найдем передаточную функцию $W_{\text{РТ}}(p)$ регулятора тока (РТ), который включают последовательно с объектом регулирования. Тип регулятора выбирают таким, чтобы скомпенсировать «большую» постоянную времени в объекте регулирования, т.е. T_α . Для этого в составе регулятора должно быть предусмотрено форсирующее звено с передаточной функцией $W(p) = T_\alpha p + 1$, которое компенсирует запаздывание, обусловленное апериодическим звеном в объекте регулирования (см. (9.9)).

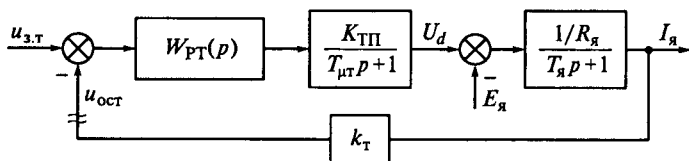


Рис. 9.14. Расчетная структурная схема контура тока

Постоянная времени в объекте регулирования объясняется физической природой объекта. Уменьшить вызванное ею запаздывание можно, приложив к цепи якоря большее форсировочное напряжение, которое затем регулятором будет снято. При этом изменением ЭДС якоря $E_{\text{я}}$ пренебрегают.

Исходя из указанных соображений принимают передаточную функцию регулятора тока следующей:

$$W_{\text{РТ}}(p) = \frac{T_{\text{я}}p + 1}{a_{\text{м.т}} \frac{K_{\text{ТП}}k_{\text{т}}}{R_{\text{я}}} T_{\text{мт}}p} = \frac{T_{\text{я}}p + 1}{T_{\text{и.т}}p} = K_{\text{РТ}} + \frac{1}{T_{\text{и.т}}p}, \quad (9.10)$$

где $T_{\text{и.т}}$ — постоянная времени интегрирования регулятора тока.

Постоянная времени

$$T_{\text{и.т}} = a_{\text{м.т}} \frac{K_{\text{ТП}}k_{\text{т}}}{R_{\text{я}}} T_{\text{мт}},$$

где $a_{\text{м.т}}$ — коэффициент настройки контура тока на модульный оптимум; $k_{\text{ТП}}$ — передаточный коэффициент тиристорного преобразователя; $k_{\text{т}}$ — коэффициент обратной связи по току; $T_{\text{мт}}$ — малая некоменсируемая постоянная времени контура тока; $K_{\text{РТ}}$ — коэффициент усиления регулятора тока, $K_{\text{РТ}} = T_{\text{я}}/T_{\text{и.т}}$.

Следовательно, регулятор тока представляет собой пропорционально-интегральное звено. Передаточная функция контура тока (КТ), оптимизированного в соответствии с (9.10), имеет вид

$$W_{\text{КТ}}(p) = \frac{1}{k_{\text{т}}} \frac{1}{a_{\text{м.т}} T_{\text{мт}}^2 p^2 + a_{\text{м.т}} T_{\text{мт}} p + 1}.$$

Учитывая, что $T_{\text{мт}}^2$ очень мало, это выражение можно упростить и считать, что оптимизированный контур тока имеет передаточную функцию

$$W_{\text{КТ}}(p) = \frac{1}{k_{\text{т}}} \frac{1}{a_{\text{м.т}} T_{\text{мт}} p + 1}. \quad (9.11)$$

При ступенчатом сигнале $u_{\text{з.т}}$ (напряжение задания тока) установившаяся ошибка регулирования тока равна нулю.

Передаточной функции контура тока в виде (9.11) соответствует так называемая настройка на модульный оптимум (МО). При стандартной настройке принимают $a_{\text{м.т}} = 2$. При такой настройке при подаче на вход контура единичного ступенчатого сигнала переходный процесс будет иметь следующие показатели: время нарастания до заданного значения $t_{\text{н}} = 4,7 T_{\text{мт}}$, время переходного процесса $t_{\text{п.п}} = 8,4 T_{\text{мт}}$, перерегулирование $\sigma = 4,3 \%$.

Переходные функции в контуре тока $y = I_{\text{я}} = f(t/T_{\text{м}})$ при настройке на модульный оптимум показаны на рис. 9.15.

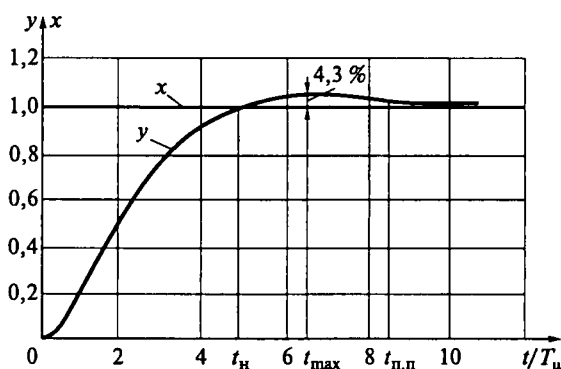


Рис. 9.15. Переходные функции $y = f(t/T_\mu)$ контура регулирования, настроенного на модульный оптимум $a_m = 2$ при подаче на вход единичного сигнала $x = 1$:

I_μ — некомпенсируемая постоянная времени контура; $t_{п.п}$ — время переходного процесса

Коэффициент обратной связи по току рассчитывают по формуле

$$k_T = \frac{u_{з.т \max}}{I_{\max \text{ доп}}},$$

где $u_{з.т \max}$ — напряжение задания максимального тока для серийных операционных усилителей с учетом возможных перерегулирований, $u_{з.т \max} = 8$ В; $I_{\max \text{ доп}}$ — максимально допустимый ток якоря.

ПИ-регулятор тока обычно реализуют на операционных усилителях (рис. 9.16). Для этой схемы

$$K_{PT} = R_{o.c}/R_{вх}; \quad T_{и.т} = R_{вх} C_{o.c}, \quad /$$

где $C_{o.c}$ — емкость конденсатора в цепи обратной связи.

В системе подчиненного регулирования заданием на контур тока $u_{з.т}$ является выходной сигнал регулятора скорости (РС).

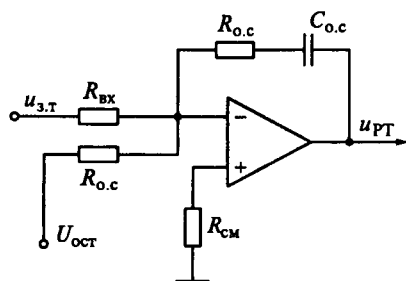


Рис. 9.16. Схема ПИ-регулятора тока

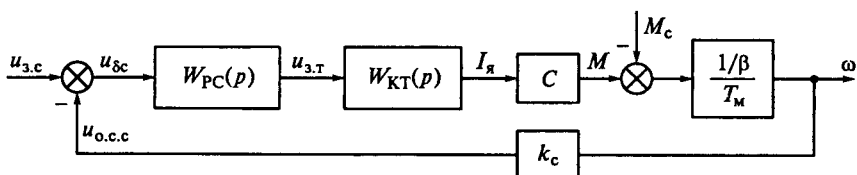


Рис. 9.17. Расчетная структурная схема контура скорости

В контуре скорости объектом регулирования в соответствии со структурной схемой двигателя постоянного тока (см. рис. 8.5) является механическая часть электропривода, представляющая собой интегрирующее звено с передаточной функцией (см. (8.11))

$$W(p) = \frac{1}{\beta T_m p}$$

и контур тока, имеющий передаточную функцию (9.11).

Расчетная структурная схема контура скорости приведена на рис. 9.17.

При настройке контура скорости на модульный оптимум (МО) будем стремиться компенсировать «большую» постоянную времени T_m , а «малая» постоянная времени $a_{м.т} T_{мт}$ остается некомпенсированной.

Полагая некомпенсируемую постоянную времени контура скорости $T_{\mu c} = a_{м.т} T_{мт}$, получим передаточную функцию регулятора скорости, который должен иметь передаточную функцию

$$W_{PC.MO}(p) = \frac{k_t \beta T_m}{a_{м.с} C k_c T_{\mu c}} = K_{PC}, \quad (9.12)$$

где $a_{м.с}$ — коэффициент настройки контура скорости на модульный оптимум; k_c — коэффициент обратной связи по скорости; $T_{\mu c}$ — малая некомпенсируемая постоянная времени контура скорости; K_{PC} — коэффициент усиления регулятора скорости.

Таким образом, для настройки контура скорости на модульный оптимум следует применять П-регулятор с коэффициентом усиления K_{PC} . При стандартной настройке принимают $a_{м.с} = 2$.

Передаточная функция контура скорости по задающему воздействию при настройке на модульный оптимум будет такой:

$$W_{MO u_{з.с} \rightarrow \omega}(p) = \frac{1}{k_c} \frac{1}{a_{м.с} T_{\mu c}^2 p^2 + a_{м.с} T_{\mu c} p + 1}. \quad (9.13)$$

Переходные функции $y = \omega = f(t/T_m)$ в контуре скорости при подаче на вход контура единичного сигнала $x = 1$ и $k_c = 1$ идентичны показанным на рис. 9.15: время нарастания до заданного зна-

чения $t_n = 4,7 T_{\mu c}$, время переходного процесса $t_{п.п} = 8,4 T_{\mu c}$, перерегулирование $\sigma = 4,3 \%$, число колебаний $n_k = 1$.

Коэффициент обратной связи по скорости

$$k_c = \frac{u_{o.c.c \max}}{\omega_n} = \frac{u_{з.с \max}}{\omega_n},$$

где $u_{з.с \max} = 8$ В для серийных операционных усилителей с учетом возможных перерегулирований.

Передаточная функция контура скорости по возмущению от момента сопротивления при настройке на модульный оптимум имеет следующий вид:

$$W_{M_c \rightarrow \Delta \omega}(p) = \frac{\Delta \omega(p)}{M_c(p)} = -\frac{a_{м.с} T_{\mu c}}{\beta T_m} \frac{(T_{\mu c} p + 1)}{a_{м.с} T_{\mu c}^2 p^2 + a_{м.с} T_{\mu c} p + 1}. \quad (9.14)$$

Из формулы (9.14) следует, что контур скорости при настройке на модульный оптимум имеет статизм при воздействии M_c и установившееся отклонение скорости вследствие ступенчатого воздействия момента сопротивления при $p \rightarrow 0$ такое:

$$\Delta \omega_{м.уст} = M_c(p) W_{M_c \rightarrow \Delta \omega}(p) = -M_c \frac{a_{м.с} T_{\mu c}}{\beta T_m}. \quad (9.15)$$

Соответственно при настройке контура скорости на модульный оптимум модуль жесткости механической характеристики

$$\beta_{MO} = \frac{\Delta M_c}{\Delta \omega} = \frac{\beta T_m}{a_{м.с} T_{\mu c}}.$$

Уравнение механической характеристики системы регулирования скорости при настройке контура скорости на модульный оптимум следующее:

$$\omega_{MO} = \omega_0 - \Delta \omega = \frac{u_{з.с}}{k_c} - \frac{M_c}{\beta_{MO}} = \frac{u_{з.с}}{k_c} - M_c \frac{a_{м.с} T_{\mu c}}{\beta T_m}. \quad (9.16)$$

При настройке системы регулирования скорости на модульный оптимум статизм по моменту сопротивления (%)

$$S_{м.с} = \frac{\Delta \omega}{\omega_{зад}} = \frac{a_{м.с} T_{\mu c}}{\beta T_m} \frac{k_c \Delta M}{u_{з.с}} 100,$$

где $\omega_{зад}$ — заданная скорость электропривода, $\omega_{зад} = u_{зад}/k_c$.

Самый большой статизм система имеет на нижней характеристике диапазона регулирования. Поэтому с точки зрения возможного диапазона регулирования скорости система с настройкой на модульный оптимум имеет сравнительно низкие показатели качества регулирования и соответственно ограниченное применение.

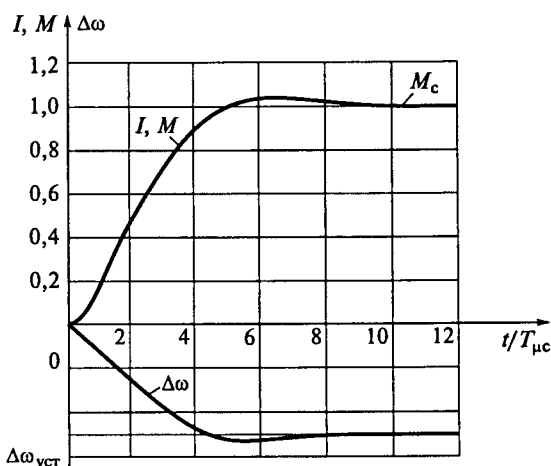


Рис. 9.18. Переходные процессы компенсации возмущения на M_c при настройке контура скорости на модульный оптимум

На рис. 9.18 показаны графики переходных процессов компенсации возмущения от M_c .

Схема двухконтурной системы привода ТГ—Д показана на рис. 9.19.

В этой схеме электропривод ТП—Д имеет двухконтурную схему подчиненного регулирования с внутренним контуром тока и внешним контуром скорости, настроенными на модульный оптимум. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения питается от тиристорного преобразователя ТП. Напряжение преобразователя регулируется посредством системы импульсно-фазового управления (СИФУ). Управляющий сигнал U_y на СИФУ поступает с выхода регулятора тока. Обратная связь по току якоря реализуется с помощью датчика тока (ДТ). Измерительным элементом для этого датчика является шунт сопротивлением $R_{ш}$, включенный в цепь якоря.

Контур тока подчиняется контуру скорости. Задание на ток $u_{з,т}$ поступает с выхода регулятора скорости (РС). Ограничение этого задания (отсечка по току) реализуется с помощью стабилитронов $VD1$ и $VD2$, включенных параллельно регулятору скорости.

Задание на контур скорости $u_{з,с}$ подается на вход регулятора скорости. Обратная связь по скорости выполняется с помощью тахогенератора (ТГ).

Пример 9.1. У электропривода по системе ТП—Д с двухконтурной системой подчиненного регулирования (см. рис. 9.19) контуры тока и скорости настроены на модульный оптимум.

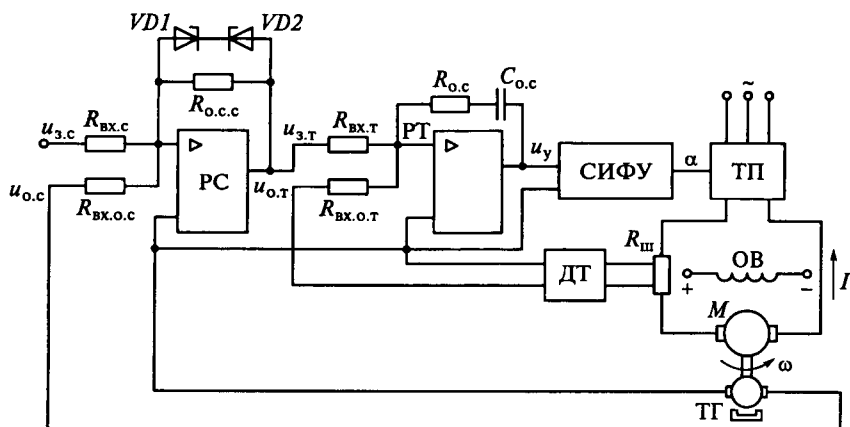


Рис. 9.19. Схема двухконтурной системы регулирования привода ТП—Д: М — двигатель; ОВ — обмотка возбуждения; ТП — тиристорный преобразователь; СИФУ — система импульсно-фазового управления преобразователя; ДТ — датчик тока; РТ, РС — регуляторы соответственно тока и скорости; VD1, VD2 — стабилитроны; $R_{вх.т}$, $R_{вх.с}$ — входные резисторы соответственно регуляторов тока и скорости; $R_{вх.о.т}$, $R_{вх.о.с}$ — резисторы обратной связи по току и скорости; $R_{о.с}$, $C_{о.с}$ — соответственно резистор и конденсатор в цепи обратной связи регулятора тока; $R_{о.с.с}$ — резистор в цепи обратной связи регулятора скорости; $R_{ш}$ — шунт; $u_{о.т}$ — сигнал обратной связи по току; α — угол регулирования ТП

Задача — рассчитать сопротивления настроечных резисторов $R_{о.с}$, $R_{вх.т}$, $R_{о.с.с}$, $R_{вх.с}$ и емкость конденсатора $C_{о.с}$.

Технические данные двигателя постоянного тока с независимым возбуждением: $P_H = 18$ кВт; $U_{я.н} = 440$ В; $I_{я.н} = 41,4$ А; $a_{м.т} = 2$; $\omega_H = 104,5$ с⁻¹; $C = 4,16$ В · с; $R_{я.ц} = 0,45$ Ом; $L_{я.ц} = 0,01$ Гн; $J_{\Sigma} = 0,9$ кг · м²; $u_{3.т} = u_{3.с} = 0 \dots 8$ В; $T_{\mu т} = 0,0066$ с; $u_{y \max} = 8$ В; $C_{о.с} = 2,0$ мкФ.

Решение. 1. Электромагнитная постоянная времени

$$T_{я} = \frac{L_{я.ц}}{R_{я.ц}} = \frac{0,01}{0,45} = 0,02 \text{ с.}$$

2. Электромеханическая постоянная времени

$$T_{м} = \frac{J_{\Sigma} R_{я.ц}}{C^2} = \frac{0,9 \cdot 0,45}{4,16^2} = 0,023 \text{ с.}$$

3. Передаточный коэффициент тиристорного преобразователя

$$K_{ТП} = \frac{U_{я.н}}{u_{y \max}} = \frac{440}{8} = 55.$$

4. Коэффициент обратной связи по скорости

$$k_c = \frac{u_{3.с \max}}{\omega_H} = \frac{8}{104,5} = 0,077 \text{ В · с.}$$

5. Коэффициент обратной связи по току с учетом возможной двукратной перегрузки

$$k_T = \frac{u_{э.т \max}}{I_{\max}} = \frac{8}{2I_{я.н}} = \frac{8}{2 \cdot 41,4} = 0,097 \text{ В / А.}$$

6. Принимаем ПИ-регулятор тока, у которого передаточная функция

$$W(p)_{PT} = K_{PT} + \frac{1}{T_{и.т}p};$$

$$T_{и.т} = \frac{a_{м.т} K_{ТП} k_T T_{мт}}{R_{я}} = \frac{2 \cdot 55 \cdot 0,097 \cdot 0,0066}{0,45} = 0,156 \text{ с;}$$

$$K_{PT} = \frac{T_{я}}{T_{и.т}} = \frac{0,02}{0,156} = 0,13.$$

7. Сопротивление резисторов в регуляторе тока

$$R_{о.с} = \frac{T_{и.т}}{C_{о.с}} = \frac{0,156}{2 \cdot 10^{-6}} = 78 \text{ кОм;}$$

$$R_{вх} = \frac{R_{о.с}}{K_{PT}} = \frac{78 \cdot 10^3}{0,13} = 600 \text{ кОм.}$$

8. Принимаем П-регулятор скорости, у которого

$$K_{PC} = \frac{k_T C T_m}{a_{м.с} R_{я} k_c T_{мс}} = \frac{0,097 \cdot 4,16 \cdot 0,023}{2 \cdot 0,45 \cdot 0,077 \cdot 0,0132} = 10,1,$$

где $T_{мс} = a_{мт} T_{мт} = 2 \cdot 0,0066 = 0,0132 \text{ с.}$

9. Сопротивление резисторов в регуляторе скорости $R_{вх} = 10 \text{ кОм}$, тогда сопротивление обратной связи

$$R_{о.с} = K_{PC} R_{вх} = 10,1 \cdot 10 \cdot 10^3 = 101 \text{ кОм.}$$

Если электропривод должен иметь большой диапазон регулирования скорости или требуется высокая точность поддержания заданной скорости, то используется ПИ-регулятор скорости. В этом случае контур тока настраивают на симметричный оптимум.

У регулятора скорости, настроенного на симметричный оптимум (СО), передаточная функция

$$W_{PC.CO}(p) = K_{PC} + \frac{1}{T_{и.с}p}. \quad (9.17)$$

Здесь $T_{и.с} = \frac{a_{с.с} T_{мс} C k_c}{k_T \beta T_m}$; $K_{PC} = \frac{4 T_{мс}}{T_{и.с}}$, где $a_{с.с} = 8$ — коэффициент настройки контура скорости на симметричный оптимум.

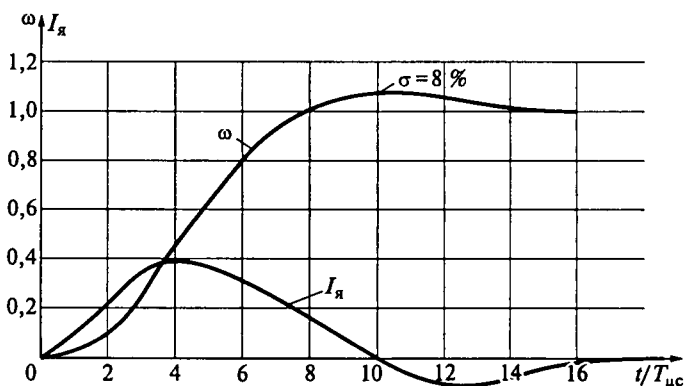


Рис. 9.20. Переходные функции в контуре скорости, настроенном на симметричный оптимум

У замкнутого контура скорости в этом случае передаточная функция

$$W_{\text{КС.СО}}(p) = \frac{1}{k_c} \frac{4T_{\mu c}p + 1}{a_{\text{м.с}}T_{\mu c}^3p^3 + a_{\text{м.с}}T_{\mu c}^2p^2 + a_{\text{м.с}}T_{\mu c}p + 1}. \quad (9.18)$$

При подаче на вход системы ступенчатого управляющего сигнала $u_{3.c}$ установившаяся скорость

$$\omega_{\text{уст}} = \frac{u_{3.c}}{k_c}.$$

Переходный процесс в этом случае характеризуется следующими показателями качества: $t_{\text{п.п}} = 16,5T_{\mu c}$; $t_n = 3,1T_{\mu c}$; $\sigma = 43\%$.

Одним из главных достоинств настройки на симметричный оптимум является то, что система регулирования будет астатической по возмущению по нагрузке M_c , т.е. при приложении нагрузки установившееся значение скорости останется неизменным, равным заданному, а статическая ошибка $\Delta\omega_c = 0$.

Для того чтобы уменьшить колебательность переходного процесса, на входе регулятора скорости включают фильтр с передаточной функцией аperiодического звена

$$W(p)_\phi = \frac{1}{4T_{\mu c}p + 1}.$$

Тогда передаточная функция контура скорости, настроенного на симметричный оптимум, с фильтром

$$W_{\text{КС.СОФ}}(p) = \frac{1}{k_c} \frac{1}{a_{\text{м.с}}T_{\mu c}^3p^3 + a_{\text{м.с}}T_{\mu c}^2p^2 + a_{\text{м.с}}T_{\mu c}p + 1}. \quad (9.19)$$

Переходные функции при настройке на симметричный оптимум с фильтром на входе показаны на рис. 9.20. Показатели качества переходного процесса: $t_{п.п} = 13,3 T_{мс}$; $t_{п} = 7,6 T_{мс}$; $\sigma = 8 \%$.

Включение фильтра не вносит изменения в процесс отработки возмущающего воздействия по M_c ; установившаяся ошибка по скорости будет равна нулю.

Системы регулирования положения строят как трехконтурные, где внешний контур положения управляет контуром скорости.

9.8. Типовые системы управления асинхронными частотно-регулируемыми электроприводами

Асинхронные регулируемые электроприводы переменного тока обычно строятся на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с частотным управлением. При этом в качестве источников питания применяются полупроводниковые преобразователи частоты (ПЧ), работающие в режиме источника напряжения (ПЧН) или источника тока (ПЧТ).

Целесообразный способ управления двигателем зависит от технических требований к системе электропривода. В электроприводах с ограниченным диапазоном регулирования и отсутствием динамических режимов работы применяется частотно-параметрический способ, при котором регулируются частота и действующее значение выходного напряжения ПЧН в соответствии с заданной скоростью.

В электроприводах с диапазоном регулирования $D \leq 100:1$, к динамическим режимам которых предъявляют высокие требования, применяется частотно-токовый способ, при котором регулируются частота и действующее значение выходного тока ПЧТ в зависимости от абсолютного скольжения двигателя при заданных скорости и действующей нагрузке.

В электроприводах с большим диапазоном регулирования скорости и высокими требованиями к динамическим характеристикам применяется регулирование мгновенных значений трехфазной системы питающих напряжений и токов с использованием векторного принципа регулирования.

Наиболее простыми системами частотного регулирования являются частотно-параметрические системы. Такие системы обеспечивают диапазон регулирования скорости до $D = 20:1$ при статической ошибке $5 \dots 10 \%$. Обычно это разомкнутые по скорости системы частотного регулирования, у которых требуемое семейство механических характеристик асинхронного двигателя получается посредством формирования регулировочной характеристики преобразователя частоты — отношения напряжения питания двигателя к частоте: $U_{ПЧ}/f_{ПЧ}$.

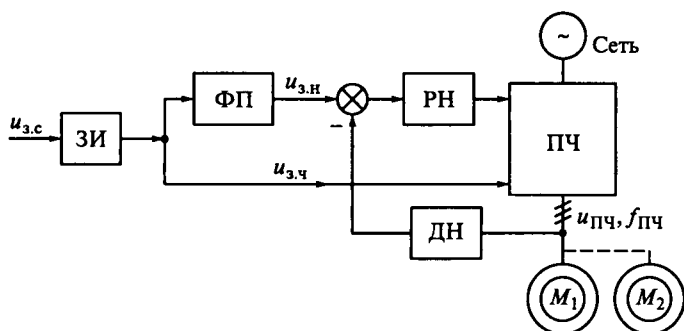


Рис. 9.21. Функциональная схема системы асинхронного электропривода с частотно-параметрическим регулированием:

$u_{з.с}$ — сигнал задания скорости; ЗИ — задатчик интенсивности; ФП — функциональный преобразователь; $u_{з.н}$ — сигнал задания напряжения; $u_{з.ч}$ — сигнал задания частоты; РН — регулятор напряжения; ДН — датчик напряжения; ПЧ — преобразователь частоты; $u_{ПЧ}$, $f_{ПЧ}$ — соответственно напряжение и частота на выходе преобразователя

Функциональная схема такой системы электропривода приведена на рис. 9.21. Частота $f_{ПЧ}$ определяется задаваемой скоростью ω_z . У канала регулирования частоты преобразователя линейная регулировочная характеристика $f_{ПЧ}(u_{з.с})$. В канал регулирования напряжения включается функциональный преобразователь (ФП), который обеспечивает требуемое соотношение между частотой и напряжением. При этом желательно предусмотреть отрицательную обратную связь по выходному напряжению $U_{ПЧ}$, чтобы преобразователь частоты обладал свойствами источника напряжения. Это позволяет достаточно точно выполнять требуемое соотношение между частотой и напряжением. Наиболее часто встречающиеся соотношения рассмотрены в подразд. 6.2.

Электроприводы с частотно-параметрическим регулированием скорости применяют в технологических установках, работающих в длительном режиме с относительно медленным изменением скорости. Наиболее часто их применяют для регулируемого привода насосов и вентиляторов. Такие системы целесообразно также использовать, если по технологии требуется одновременное регулирование скорости группы однотипных электроприводов. В этом случае преобразователь частоты является общим источником питания для группы приводов.

Асинхронные электроприводы с диапазоном регулирования скорости $D \leq 100:1$ и высокими требованиями к динамике, когда осуществляются частые пуски, торможения и реверсы, выполняют как системы с частотно-токовым управлением. В таких системах преобразователь частоты работает в режиме источника тока.

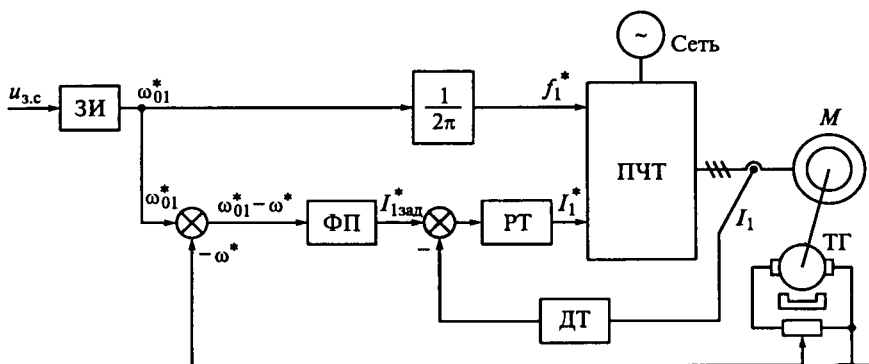


Рис. 9.22. Функциональная схема системы асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением:

ω_{01} , ω^* — соответственно скорость холостого хода и текущее значение скорости; f_1^* — частота напряжения статора; $I_{1\text{зад}}$, I_1^* — соответственно задание на ток и ток статора; РТ — регулятор тока статора; М — асинхронный двигатель; ДТ — датчик тока; ПЧТ — преобразователь частоты тока

Это достигается применением преобразователей частоты типа ПЧТ или преобразователей частоты типа ПЧН, которые охватываются отрицательной обратной связью по току. Система регулирования осуществляет задание частоты и тока статора в соответствии с заданными скоростью и нагрузкой на валу двигателя.

Функциональная схема асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением приведена на рис. 9.22. У системы регулирования два канала: канал частоты и канал тока статора. Выходная частота преобразователя ПЧТ задается пропорционально заданной скорости. Ток статора задается в зависимости от рассогласования заданной и действительной скоростей

$$\omega_{01} - \omega = S_{a6c}.$$

Абсолютное скольжение примерно прямо пропорционально току ротора I_2' . Приведенный к статору, он определяет активную составляющую тока I_1 . Реактивная составляющая, пропорциональная току намагничивания I_0 , поддерживается постоянной (см. рис. 3.6). Таким образом, задание на ток статора

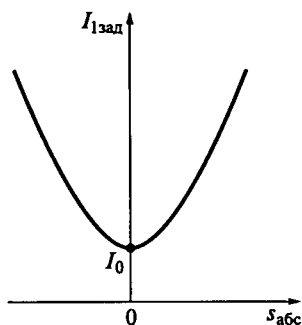


Рис. 9.23. Регулировочная характеристика функционального преобразователя:

I_0 — ток холостого хода;
 $I_{1\text{зад}}$ — заданный ток статора;
 $s_{\text{абс}}$ — абсолютное скольжение

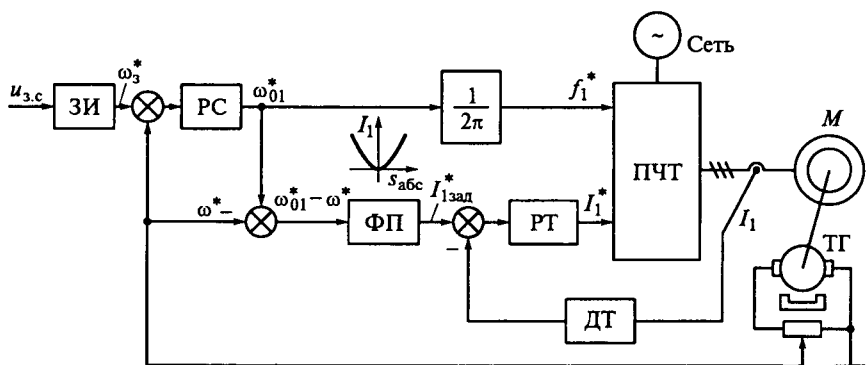


Рис. 9.24. Функциональная схема системы асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением

$$I_{1\text{зад}} = \sqrt{I_2'^2 + I_0^2} = \sqrt{[K_1 (\omega_{01} - \omega)]^2 + I_0^2}.$$

Задание на ток статора формируется функциональным преобразователем (ФП) (рис. 9.23). Для повышения быстродействия контур тока настраивают на модульный оптимум, для чего предусмотрены регулятор тока РТ (см. рис. 9.22) и обратная связь по току статора с датчиком тока ДТ. Измерение скорости выполняется тахогенератором ТГ.

Жесткость механических характеристик в системе электропривода по схеме на рис. 9.22 близка к жесткости естественной механической характеристики асинхронного двигателя. Поэтому достижимый диапазон регулирования скорости в этой системе $D \approx 20:1$.

При необходимости получения большего диапазона регулирования следует внести в систему замкнутый контур регулирования скорости (рис. 9.24). Такая система управления является двухканальной: она содержит контур скорости и контур тока статора I_1 , которые настраиваются на модульный оптимум. На выходе П-регулятора скорости формируется сигнал, пропорциональный частоте питания f_1^* и скорости поля статора. Разность этого сигнала и действительной скорости ω^* формирует сигнал, пропорциональный абсолютному скольжению, который подается на вход функционального преобразователя ФП.

В соответствии с зависимостью (см. рис. 9.23) функциональный преобразователь вырабатывает сигнал задания тока статора $I_{1\text{зад}}^*$, который подается на вход контура тока, имеющего ПИ-регулятор. Частотно-токовое управление может применяться только для однодвигательных электроприводов.

Наиболее высокие динамические характеристика и диапазон регулирования скорости $D \leq 10\,000:1$ могут быть получены при

векторном управлении асинхронным двигателем. Принцип векторного управления состоит в определении и принудительном установлении мгновенных значений токов в обмотках двигателя таким образом, чтобы обобщенные векторы токов и потокосцеплений занимали в пространстве положение, обеспечивающее создание требуемого значения электромагнитного момента.

Обобщенным вектором тока (потокосцепления) называют пространственный вектор, образованный токами во всех обмотках статора или ротора двигателя.

Электромагнитный момент, создаваемый двигателем,

$$M = k_m \bar{F}_1 \times \bar{F}_2 = k_m f_m \sin \lambda,$$

где k_m — конструктивный коэффициент; $\bar{F}_1, \bar{F}_2$ — пространственные векторы токов или потокосцеплений статора и ротора; $f_m = |\bar{F}_1| \times |\bar{F}_2|$; λ — пространственный угол между векторами $\bar{F}_1$ и $\bar{F}_2$.

Очевидно, что минимальные значения токов и, следовательно, потерь в обмотках машины будут, если векторы $\bar{F}_1$ и $\bar{F}_2$ перпендикулярны друг другу. В системах векторного управления нет необходимости определять абсолютное пространственное положение обоих векторов $\bar{F}_1$ и $\bar{F}_2$. Важно определить положение одного вектора относительно другого. Поэтому один из векторов принимается за базовый, а положение другого контролируется углом $\lambda = f(t)$.

С этой целью используют не обычные неподвижные пространственные координаты, связанные с конструкцией электрической машины, например со статором, а координаты, оси которых либо вращаются в пространстве с постоянной скоростью, либо связаны с одним из контролируемых векторов.

Системы векторного управления обычно строят по принципу подчиненного регулирования. Внешний контур — контур скорости — осуществляет регулирование скорости и дает задание внутреннему контуру — контуру момента, который выполняется в векторной форме.

Контрольные вопросы

1. Назовите виды электрических защит, применяемых в электроприводах.
2. Какие аппараты осуществляют максимально-токовую защиту?
3. Что такое нулевая защита?
4. Для чего нужна минимально-токовая защита в электроприводах постоянного тока?
5. Как реализуется температурная защита электрических двигателей?
6. Сколько контакторов должно быть в схеме для управления двухскоростным асинхронным двигателем?

7. Как предотвращается возможность одновременного включения контакторов «Вперед» и «Назад» в реверсивных магнитных пускателях?
8. С помощью каких аппаратов выполняются автоматические переключения ступеней роторного сопротивления при пуске асинхронного двигателя с фазным ротором?
9. В чем основное отличие замкнутых систем регулирования от разомкнутых?
10. Назовите виды обратных связей, используемых в системах регулирования электроприводов.
11. Какие обратные связи применяют для формирования статических механических характеристик электропривода?
12. В каких режимах проявляется действие гибких обратных связей?
13. Приведите классификацию систем регулирования по выполняемым функциям.
14. С помощью каких обратных связей получают жесткие механические характеристики с отсечкой по моменту (току)?
15. Поясните принцип подчиненного регулирования параметров электропривода.
16. Укажите целесообразный тип регулятора для контура тока.
17. Какие стандартные настройки применяют для контура скорости?
18. Приведите характеристику переходного процесса в контуре скорости, настроенном на модульный оптимум, если на вход подать единичный сигнал.
19. Сколько контуров будет иметь система регулирования положения?
20. Укажите основные разновидности систем регулирования асинхронного привода с частотным управлением.

10.1. Энергетические показатели электропривода

На долю электропривода приходится около 70 % всей вырабатываемой электроэнергии. Поэтому эффективность использования этой электроэнергии имеет огромное техническое и экономическое значение.

Питание на электрические приводы (за исключением приводов транспортных или мобильных машин) поступает от промышленной сети переменного тока частотой 50 Гц. Электроприводы потребляют (а при работе в рекуперативном тормозном режиме и отдают) из сети активную мощность. Активная мощность расходуется на полезную работу и покрытие потерь во всей электромеханической системе рабочей машины.

Анализируя эффективность использования электрической энергии, следует различать энергетическую эффективность самого технологического процесса, который осуществляется рабочей машиной с электроприводом, и эффективность собственно электропривода, характеризуемую его КПД, который представляет собой отношение выходной мощности $P_{\text{вых}}$ данного устройства к входной мощности $P_{\text{вх}}$, или отношение полезной мощности $P_{\text{пол}}$ (или энергии) к затраченной $P_{\text{затр}}$:

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{затр}}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{пол}} + \Delta P}, \quad (10.1)$$

где ΔP — потери в данном устройстве, $\Delta P = \frac{P_{\text{пол}}(1 - \eta)}{\eta}$.

Поскольку силовая часть электропривода состоит из электродвигательного, передаточного и преобразовательного устройств, то КПД электропривода

$$\eta = \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{преоб}},$$

где $\eta_{\text{дв}}$, $\eta_{\text{пер}}$, $\eta_{\text{преоб}}$ — КПД соответственно двигателя, передаточного и преобразовательного устройств.

КПД электродвигателя — это отношение механической мощности на валу двигателя $P_{\text{мех}}$ к потребляемой мощности $P_{\text{потр}}$ со стороны обмоток статора (для машин постоянного тока — со стороны якоря):

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{потр}}} = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{мех}} + \Delta P}.$$

У асинхронных двигателей мощностью выше 0,1 кВт номинальный КПД составляет 0,85...0,9. С ростом мощности номинальный КПД повышается и у крупных высокоскоростных двигателей переменного тока мощностью свыше 1000 кВт может достигать 0,97.

КПД электродвигателей существенно зависит от нагрузки на валу двигателя. Для анализа этой зависимости пользуются методом разделения потерь ΔP на постоянные K и переменные V :

$$\Delta P = K + V. \quad (10.2)$$

Для нерегулируемых по скорости двигателей постоянные потери включают в себя:

- потери в стали;
- механические потери, в том числе на самовентиляцию;
- добавочные потери.

Переменные потери V вычисляют по следующим формулам:

для машин постоянного тока — $V = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$;

для асинхронных двигателей — $V = 3I_1^2 r_1 + 3I_2^2 r_2$,

где $3I_1^2 r_1$ — потери в обмотке статора; $3I_2^2 r_2$ — потери в обмотке ротора.

Согласно (6.8) потери в роторной цепи

$$3I_2^2 r_2 = M \omega_0 s.$$

Ориентировочно можно считать, что потери в обмотках статора относятся к потерям в обмотках ротора пропорционально r_1/r_2 . Тогда переменные потери для асинхронных двигателей

$$V = M \omega_0 s \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right). \quad (10.3)$$

Пример 10.1. Найти КПД асинхронного двигателя 4АИ160S4 при работе с нагрузкой 50 %.

Номинальные технические данные двигателя: $P_{\text{н}} = 18,5$ кВт; $\omega_{\text{ном}} = 152$ с⁻¹; $\eta_{\text{н}} = 0,88$; $r_1/r_2' = 0,6$; $s_{\text{н}} = 0,033$.

Решение. 1. Потери в двигателе в номинальном режиме

$$\Delta P_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} (1 - \eta_{\text{н}})}{\eta_{\text{н}}} = \frac{18\,500 (1 - 0,88)}{0,88} = 2520 \text{ Вт}.$$

2. Переменные потери в номинальном режиме

$$V_H = \frac{P_H}{\omega_H} \omega_0 s_H \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right) = \frac{18\,500}{152} 157 \cdot 0,033 (1 + 0,6) = 1110 \text{ Вт.}$$

3. Постоянные потери

$$K = \Delta P_H - V_H = 2520 - 1110 = 1410 \text{ Вт.}$$

4. При нагрузке на валу $M_c = 0,5 M_H$ двигатель будет работать со скольжением $s \approx 0,5 s_H$. Тогда переменные потери в этом режиме

$$V_{0,5} = 0,5 M_H \omega_0 0,5 s_H \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right) = 0,25 V_H = 0,25 \cdot 1110 = 278 \text{ Вт.}$$

5. Потери в двигателе в этом режиме

$$\Delta P_{0,5} = K + V_{0,5} = 1410 + 278 = 1688 \text{ Вт.}$$

6. КПД двигателя при нагрузке 50 %

$$\eta_{0,5} = \frac{0,5 P_H}{0,5 P_H + \Delta P_{0,5}} = \frac{0,5 \cdot 18\,500}{0,5 \cdot 18\,500 + 1688} = 0,845.$$

Очевидно, что при работе с неполной нагрузкой КПД двигателя снижается. Типичная кривая зависимости КПД асинхронного двигателя от нагрузки показана на рис. 10.1. Из рис. 10.1 видно, что завышение установленной мощности двигателя ведет к снижению его эксплуатационного КПД, т.е. к непроизводительному расходу электроэнергии.

КПД преобразовательного устройства, выполненного на базе силовых полупроводниковых приборов, довольно велико. Потери в преобразователе определяются главным образом прямым падением напряжения в полупроводниковом приборе. В среднем можно считать, что $\Delta U = 2 \text{ В}$, для мостовых схем $\Delta U = 4,0 \text{ В}$. Таким обра-

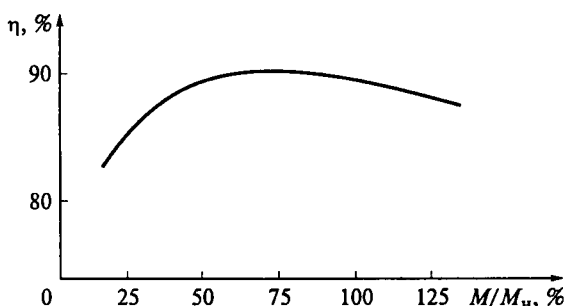


Рис. 10.1. Зависимость КПД асинхронного двигателя 4АИ160S4 от нагрузки

зом, номинальные потери для преобразователей напряжением 440 В составляют 1%, а для преобразователей напряжением 220 В — 2%. С учетом потерь в реактивных элементах полупроводниковых преобразователей можно принимать их КПД равным 0,95...0,98.

Потери в механических передаточных устройствах (редукторе, трансмиссии и др.) определяются главным образом силами трения. Эти потери, а следовательно, КПД механической передачи зависят от типа используемых подшипников, класса обработки зубчатых колес, систем смазки и др. КПД механической передачи существенно зависит от передаваемого момента.

Под КПД рабочей машины (РМ) понимают произведение КПД электропривода $\eta_{\text{ЭП}}$ на КПД рабочей машины. Так, для вентиляторной установки

$$\eta_{\text{вен.уст}} = \eta_{\text{вен}} \eta_{\text{ЭП}} = \frac{QH \cdot 10^{-3}}{P_{\text{затр}}}, \quad (10.4)$$

где $\eta_{\text{вен}}$ — аэродинамический КПД вентилятора; Q — производительность вентилятора, м³/с; H — напор, Па; $P_{\text{затр}}$ — затраченная электрическая мощность, кВт.

Если рабочая машина работает в энергетически постоянном режиме, то ее энергоемкость, выражаемая через КПД, определяется по формуле (10.4). Если рабочая машина работает циклически (например, грузоподъемные механизмы, продольно-строгольные станки и др.), то более правильно КПД рабочей машины определять по затратам энергии за цикл работы:

$$\eta_{\text{РМ}} = \frac{W_{\text{ц.пол}}}{W_{\text{ц.затр}}}, \quad (10.5)$$

где $W_{\text{ц.пол}} = \int_0^{t_{\text{ц}}} P_{\text{пол}}(t) dt$; $W_{\text{ц.затр}} = \int_0^{t_{\text{ц}}} P_{\text{затр}}(t) dt$ — соответственно полезная работа за цикл, затраченная энергия за цикл.

В сети переменного тока, из которой поступает питание на электропривод, циркулирует реактивная мощность, вследствие чего происходит загрузка сети питания реактивным током, не создающим работы. Реактивная мощность оценивается величиной $\cos \varphi$, где угол φ — фаза сдвига первой гармоники тока относительно первой гармоники напряжения. У асинхронных короткозамкнутых двигателей номинальный $\cos \varphi \approx 0,7...0,8$. Недогрузка асинхронного двигателя ведет к дальнейшему снижению $\cos \varphi$.

В приводах по системе ТП — Д (см. подразд. 5.3) $\cos \varphi = \cos \alpha$, что определяется запаздыванием, устанавливаемым системой импульсно-фазового управления, открывания тиристоров. Поэтому

в приводах ТП—Д при высокой скорости $\cos\varphi$ в сети питания переменного тока будет высоким (0,8...0,9), по мере снижения скорости, когда угол α растет, $\cos\varphi$ будет уменьшаться. При включении привода ТП—Д происходят «броски» реактивной мощности.

В современных системах регулируемого электропривода стремятся использовать неуправляемые выпрямители, осуществляя регулирование величины напряжения, подаваемого к обмоткам двигателя, широтно-импульсными методами (см., например, схемы на рис. 5.29 и рис. 6.12). В этом случае $\cos\varphi$ в сети питания будет не ниже 0,95.

С точки зрения компенсации реактивной мощности многих потребителей электроэнергии эффективно использование для нерегулируемых электроприводов синхронных двигателей большой мощности, которые при перевозбуждении способны генерировать реактивную мощность для ее компенсации в энергосистеме предприятия.

10.2. Потери энергии в переходных режимах

Потери энергии в переходных режимах, как правило, возрастают, поскольку эти процессы сопровождаются большими бросками тока. Так, при пуске асинхронного короткозамкнутого двигателя пусковой ток в 5—6 раз выше номинального. В процессе разгона двигатель должен не только преодолевать момент сопротивления, но и создавать динамический момент, идущий на увеличение кинетической энергии движущихся масс.

Рассмотрим потери энергии в короткозамкнутом асинхронном двигателе за время пуска вхолостую ($M_c = 0$). В процессе пуска при разгоне двигателя скольжение $s = 1 \dots 0$. В этот период в цепи ротора выделяются значительные потери энергии, что особенно неблагоприятно для короткозамкнутых двигателей, где эти потери не могут быть вынесены из машины в пусковые резисторы.

Так как потери в роторе пропорциональны моменту и скольжению:

$$\Delta P = M \omega_0 s, \quad (10.6)$$

то за один пуск потери энергии

$$\Delta A = \int_0^{t_n} M \omega_0 s dt, \quad (10.7)$$

где t_n = время пуска.

При пуске вхолостую $M = J_{\Sigma}(d\omega/dt)$. Подставив это выражение в (10.7) и заменив пределы интегрирования, получим

$$\Delta A = \int_0^{\omega_0} J_{\Sigma} \omega_0 s d\omega = J_{\Sigma} \int_0^{\omega_0} (\omega_0 - \omega) d\omega;$$

$$\Delta A = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2}. \quad (10.8)$$

Следовательно, при пуске асинхронного двигателя вхолостую потери в цепи его ротора равны запасу кинетической энергии, который получают приводимые в движение маховые массы ротора двигателя и рабочего механизма при их разгоне до установившейся скорости.

Следует учитывать, что потери в роторе не зависят от времени пуска, пусковых токов и других параметров. Потери в статоре, напротив, зависят от параметров пуска.

Во избежание перегрева для каждого короткозамкнутого двигателя предусмотрен предельно допустимый суммарный момент инерции $J_{\Sigma \text{ пред}}$, который может преодолеть данный двигатель. Значения $J_{\Sigma \text{ пред}}$ при пуске указывают в каталогах. При отсутствии этих данных значение $J_{\Sigma \text{ пред}}$ может быть определено из следующих соображений. Допустимая энергия, выделяющаяся в клетке ротора массой $m_{\text{кл}}$, не должна приводить к ее перегреву более чем на $T_{\text{пер}} = 300^\circ\text{C}$. Следовательно, допустимые потери

$$\Delta A_{\text{доп}} = m_{\text{кл}} C_{\text{кл}} T_{\text{пер}},$$

где $C_{\text{кл}}$ — удельная теплоемкость материала клетки ротора, Дж/(кг·°C).

Расчет проводят исходя из необходимости обеспечения двух последовательных пусков. Поэтому $2\Delta A_{\text{доп}} < m_{\text{кл}} C_{\text{кл}} \cdot 300$. Учитывая это, получим

$$J_{\Sigma \text{ пред}} < \frac{m_{\text{кл}} C_{\text{кл}} \cdot 300}{\omega_0^2}.$$

Потери энергии в роторной цепи двигателя при динамическом торможении от скорости ω_0 до минимальной скорости (затормозить двигатель до нулевой скорости при динамическом торможении нельзя) также равны запасу кинетической энергии, которой обладали движущиеся массы ротора и рабочей машины.

При торможении противовключением двигатель работает при еще больших скольжениях: $s = 2 \dots 1$. Подставив эти значения в (10.7), получим, что потери энергии при торможении противовключением

$$\Delta A_{\text{првк}} = 3 \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2}.$$

Для асинхронного двигателя важно определить потери при пуске и торможении не только в роторной ($\Delta A_{\text{рот}}$), но и в статорной ($\Delta A_{\text{ст}}$) цепях. Ориентировочно эти потери можно найти, зная потери в роторе и пользуясь соотношением

$$\Delta A_{\text{ст}} \approx \Delta A_{\text{рот}} \frac{r_1}{r_2'},$$

где r_1, r_2' — сопротивления обмоток соответственно статора и ротора.

Потери в статоре могут быть сокращены, например снижением напряжения на статоре при пуске (если это возможно).

При плавном изменении ω_0 в соответствии с заданным темпом разгона (при частотном управлении асинхронным двигателем или плавном повышении напряжения в приводах постоянного тока) двигатель работает с малыми скольжениями и потери в двигателе, как и в установившемся режиме, определяются развиваемым моментом.

10.3. Нагрев и охлаждение двигателя

Выделение потерь ΔP в двигателе вызывает его нагрев. Проведем упрощенный анализ процессов нагрева и охлаждения. Примем допущение, что двигатель в тепловом отношении представляет собой однородное твердое тело, характеризующееся:

- теплоемкостью C (Дж/°С), которая показывает, сколько тепловой энергии необходимо, чтобы повысить температуру двигателя на 1°С;
- теплоотдачей, характеризующейся коэффициентом A [Дж/(°С·с)], показывающим, сколько теплоты отдает двигатель окружающей среде в течение 1 с при превышении температуры двигателя над температурой окружающей среды на 1°С.

Уравнение теплового баланса будет иметь вид

$$\Delta P dt = C dt + A \tau dt, \quad (10.9)$$

где τ — превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды.

В уравнении (10.9) $\Delta P dt$ характеризует потери в двигателе, которые преобразуются в теплоту, $C dt$ — количество теплоты, идущее на нагрев двигателя, $A \tau dt$ — количество теплоты, которое двигатель отдает окружающей среде. В первое время после включения двигателя, когда его температура еще мало отличается от температуры окружающей среды ($\tau = 0$), отдача теплоты в окружающую среду отсутствует и $A \tau dt = 0$. По мере нагрева двигателя все большая часть выделяемой в двигателе теплоты передается в ок-

ружающую среду и, когда достигается равновесие между количеством выделяемой теплоты и теплоты, отдаваемой в окружающую среду, температура двигателя становится постоянной — установившейся ($\tau_{уст}$).

Преобразовав уравнения (10.9) к нормализованному виду при $\Delta P = \text{const}$, получим

$$\frac{C}{A} \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{уст}. \quad (10.10)$$

Решив это уравнение, получим

$$\tau = \tau_{уст} + (\tau_{нач} - \tau_{уст}) e^{-t/T_n}, \quad (10.11)$$

где $\tau_{уст}$ — установившаяся температура, которая зависит от потерь в двигателе, т.е. от его нагрузки, $\tau_{уст} = \Delta P/A$; T_n — постоянная времени нагрева двигателя, $T_n = C/A$.

Обычно принимают температуру окружающей среды, равной начальной температуре перегрева. Тогда начальная температура $\tau_{нач} = 0$, и уравнение (10.11) примет вид

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-t/T_n}). \quad (10.12)$$

Переходная характеристика нагрева двигателя приведена на рис. 10.2. Она носит экспоненциальный характер. За время, равное T_n , двигатель нагреется до температуры $0,63\tau_{уст}$. Время нагрева до установившейся температуры — примерно $3T_n$.

Пример 10.2. Два двигателя с одинаковыми параметрами одновременно включаются в работу. Нагрузка на валу первого двигателя равна номинальной. Нагрузка на валу второго — 50 % от номинальной. Постоянные времени нагрева двигателей равны 20 мин.

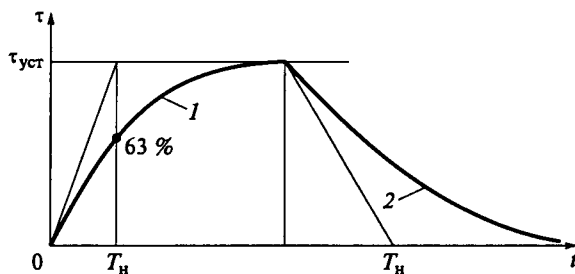


Рис. 10.2. Переходные характеристики двигателя:

1 — нагрев; 2 — охлаждение

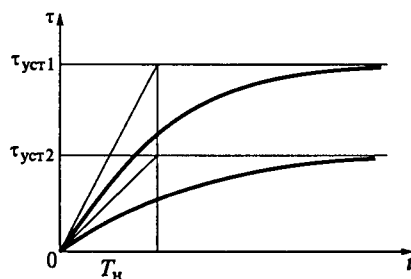


Рис. 10.3. Переходные характеристики нагрева двигателей

Задача — определить, за какое время каждый из двигателей нагреется до установившейся температуры.

Решение. Поскольку постоянные нагрева обоих двигателей равны, их температура достигнет своего установившегося значения за одно и то же время $t = 3T_n = 3 \cdot 20 = 60$ мин, т.е. $t = 1$ ч. Установившаяся температура перегрева у двигателей будет разной: у более нагруженного двигателя эта температура будет примерно в 2 раза выше (рис. 10.3).

При охлаждении изменение температуры во времени описывается уравнением (10.11).

Если двигатель отключится и будет остывать до температуры окружающей среды (как показано на рис. 10.2), то $\tau_{уст} = 0$.

Тогда

$$\tau = \tau_{нач} e^{-t/T_n}.$$

Следует иметь в виду, что для самовентилируемых двигателей коэффициент A существенно зависит от скорости, поэтому охлаждаются такие двигатели намного медленнее, чем нагреваются. Постоянная времени нагрева при охлаждении T'_n больше, чем при нагреве: $T'_n > T_n$.

Исходя из особенностей режимов нагрева и охлаждения двигателей различают восемь режимов работы, основными из которых являются: продолжительный (S1), кратковременный (S2) и повторно-кратковременный (S3).

Продолжительный режим (S1) — режим работы электродвигателя при неизменной нагрузке такой продолжительности, при которой превышение температуры электродвигателя достигает установившегося значения. Графики изменения мощности P на валу и температуры перегрева τ , соответствующие этому режиму, приведены на рис. 10.4, а.

В паспортных данных двигателя указывают номинальные мощность P_n , скорость ω_n , напряжение U_n , ток I_n , соответствующие режиму S1.

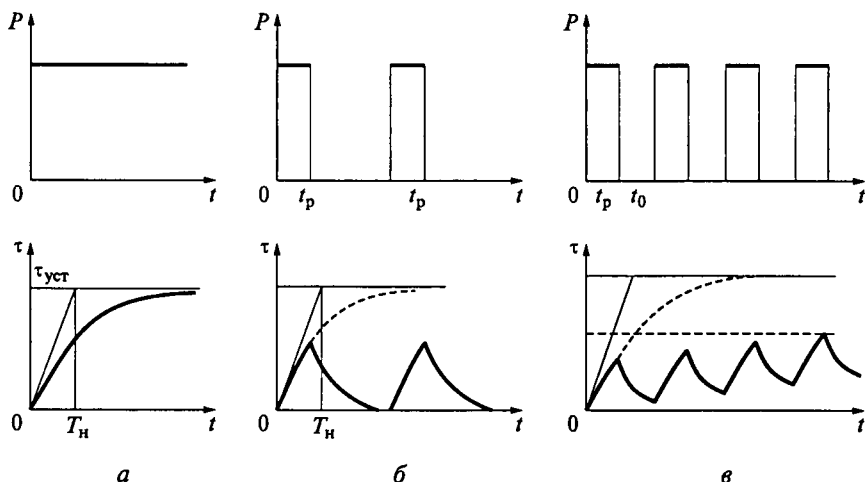


Рис. 10.4. Температурные характеристики двигателя при режимах работы: *а* — продолжительном; *б* — кратковременном; *в* — повторно-кратковременном

Кратковременный режим (S2) — это режим, в котором периоды нагружения чередуются с периодами отключения двигателя. При этом за время работы двигателя превышение температуры не достигает установившегося значения, а при отключении все части электродвигателя охлаждаются до температуры окружающей среды. Режим характеризуется мощностью (моментом) и временем работы t_p . Стандартная продолжительность рабочего периода составляет 10, 30, 60, 90 мин.

Графики, характеризующие кратковременный режим работы, показаны на рис. 10.4, *б*.

Повторно-кратковременный режим (S3) — это режим, при котором кратковременные периоды нагружения чередуются с периодами отключения двигателя, причем за время работы превышение температуры двигателя не достигает установившегося значения, а при отключении двигатель не успевает остыть до температуры окружающей среды (рис. 10.4, *в*). Режим S3 характеризуется нагрузкой и относительной продолжительностью включения ПВ (%):

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_p + t_o} 100 = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} 100, \quad (10.13)$$

где t_p , t_o , $t_{\text{ц}}$ — время соответственно работы, отключенного состояния и цикла.

Стандартные значения ПВ, на которые рассчитываются электродвигатели, предназначенные для работы в режиме S3, состав-

ляют 15, 25, 40 и 60 %. Максимальное время цикла не должно превышать 10 мин.

Остальные пять номинальных режимов S4... S8 предусмотрены для того, чтобы упростить выбор электродвигателей, работающих в этих режимах. К этим режимам относятся: повторно-кратковременный с частыми пусками — S4; повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением — S5; перемежающийся — S6, когда после периода работы электродвигатель не отключается, а продолжает работать вхолостую; перемежающийся с частыми реверсами — S7; перемежающийся режим работы с двумя и более скоростями — S8.

10.4. Энергосбережение посредством электропривода

Поскольку электропривод является главным потребителем электроэнергии (до 65 % в развитых странах), проблема энергосбережения всегда является одной из основных в отношении электропривода. Следует различать энергосбережение собственно в электроприводе и создание энергосберегающих технологий на базе автоматизированного регулируемого электропривода.

Энергосбережение в электроприводе необходимо для сокращения потерь на преобразование электрической энергии в механическую и повышения энергетических показателей электропривода. Способы достижения этой цели следующие:

- правильный выбор электродвигателя по мощности. Существующая практика выбора двигателей с завышенной мощностью приводит к тому, что они работают со сниженными КПД и коэффициентом мощности;

- использование в электрическом силовом канале электропривода силовых полупроводниковых преобразователей, позволяющих преобразовывать электрическую энергию к нужному виду с достижением требуемых параметров и минимальными потерями;

- отказ от использования реостатных способов регулирования скорости двигателей;

- применение фильтро-компенсирующих устройств в цепи питания электропривода в целях повышения коэффициента мощности и фильтрации высших гармоник тока.

При энергосбережении гораздо важнее использовать возможности, которые дает автоматизированный электропривод с точки зрения энергетической оптимизации самих технологических процессов.

Проведение технологического процесса в требуемом автоматически поддерживаемом режиме сокращает непроизводительные затраты электроэнергии. Во всех установках, осуществляющих по-

дачу воздуха, воды, сыпучих и других материалов, имеется возможность экономить электроэнергию путем выбора той производительности рабочей машины, которая соответствует подаче, необходимой по условиям технологического режима в данный момент.

Поскольку, как правило, номинальную производительность машин, подающих воздух, воду, сырье, выбирают с большим запасом, возникает необходимость регулирования режима их работы. Наиболее экономичным способом регулирования производительности является изменение скорости движения рабочего органа, для чего необходим регулируемый электропривод.

Рассмотрим возможности энергосбережения на примере насосных установок водоснабжения. Необходимость регулирования напора и расхода этих установок определяется двумя причинами:

1) необходимо согласовать характеристику центробежного насоса с характеристикой гидравлической сети (зависимость напора от расхода), на которую этот насос работает. Как правило, насосы имеют более высокий напор, чем это необходимо;

2) требуемое количество воды меняется в зависимости от времени года и суток.

В настоящее время в большинстве случаев используют гидравлические способы регулирования: дросселирование или перепуск с нагнетания на всасывание (рис. 10.5). При дросселировании с помощью задвижки 1 увеличивают гидравлическое сопротивление сети.

Рассмотрим процесс регулирования на характеристиках насосной установки (рис. 10.6). Эти характеристики представляют собой зависимость напора H , развиваемого насосом, от его расхода Q . Гидравлическая сеть, на которую работает насос, имеет характеристику $H_T - A$, при которой у насоса будет расход Q_2 . Если требуется меньший расход, то с помощью задвижки увеличивают гидравлическое сопротивление, получая характеристику

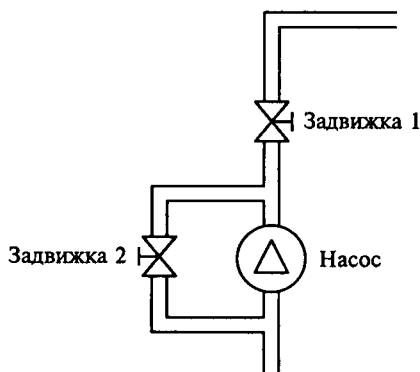


Рис. 10.5. Гидравлическая схема насосной установки

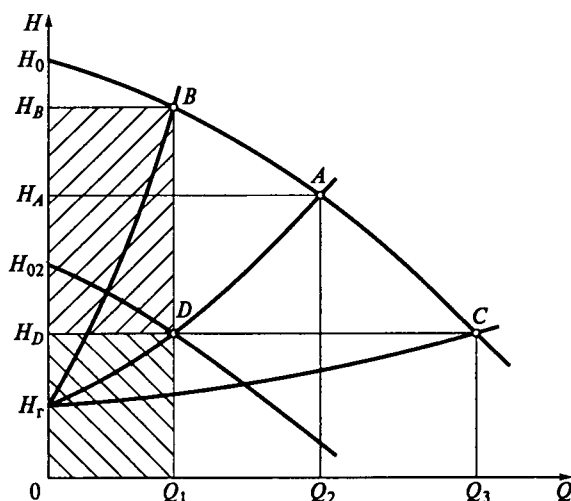


Рис. 10.6. Характеристики насосной установки:

$H_0-B-A-C$ — центробежного насоса; H_r-D-A — гидравлической сети

сети H_r-B , которой соответствует требуемый расход Q_1 . Однако при этом значительная часть мощности, пропорциональная площади H_D-H_B-B-D , будет расходоваться на преодоление сопротивления задвижки, т. е. будет тратиться бесполезно.

Еще большие непроизводительные потери мощности будут при регулировании перепуском с нагнетания на всасывание. В этом случае неполностью открывают задвижку 2 (см. рис. 10.5), уменьшая общее гидравлическое сопротивление — характеристика H_r-C . Общий расход насоса при этом возрастает до расхода Q_3 , который представляет собой сумму требуемого расхода в сети Q_1 и расхода на рециркуляцию (Q_3-Q_1). В этом случае возникают непроизводительные затраты мощности, пропорциональные площади $Q_1-D-C-Q_3$.

Избежать непроизводительных затрат мощности можно, если применить регулируемый электропривод насоса. Снизив скорость, мы получим характеристику насоса, проходящую через точку D (характеристика $H_{02}-D$), и, не прибегая к использованию задвижек, получим требуемый расход Q_1 . Дополнительные потери, связанные с регулированием производительности насоса, при этом не возникнут.

Переход к регулируемому электроприводу насосов, как показал опыт, дает до 30 % экономии электроэнергии [5].

Пример 10.3. Оценить годовой расход электроэнергии насоса мощностью 15 кВт, работающего 6000 ч в год, из них с относительной произво-

длительностью 90 % — 4000 ч в год, с относительной производительностью 45 % — 2000 ч в год.

Технические данные насоса: номинальный напор $H_n = 30$ м; номинальный расход $Q_n = 0,039$ м³/с; номинальный КПД $\eta_n = 0,76$. Характеристика насоса рассчитывается по формуле

$$H = H_0 - R_n Q^2,$$

где H_0 — напор при $Q = 0$; R_n — гидравлическое сопротивление; $H = 39 - 5900 Q$.

Насос работает на сеть с $R_n = 5900$ с²/м⁵ без геодезического напора: $H_r = 0$.

Р е ш е н и е. 1. Номинальная мощность насоса

$$P_n = \frac{1000 Q_n H_n}{102 \eta_n} = \frac{1000 \cdot 0,039 \cdot 30}{102 \cdot 0,76} = 15 \text{ кВт.}$$

2. Напор, развиваемый насосом:

при расходе $0,9 Q_n = 0,035$ м³/с $H = H_0 - R_n (0,9 Q_n)^2 = 39 - 5900 \cdot 0,035^2 = 33,8$ м;

при расходе $0,45 Q_n = 0,0175$ м³/с $H = H_0 - R_n (0,45 Q_n)^2 = 39 - 5900 \cdot 0,0175^2 = 37,2$ м.

3. Для реализации требуемых режимов требуется погасить часть напора на задвижке. Принимаем ориентировочно КПД насоса и двигателя постоянными: $\eta_n = 0,76$; $\eta_{дв} = 0,9$. Мощность, потребляемая двигателем насосной установки:

$$\text{при } Q = 0,9 Q_n \quad P = \frac{1000 Q H}{102 \eta_n \eta_{дв}} = \frac{1000 \cdot 0,035 \cdot 33,8}{102 \cdot 0,76 \cdot 0,9} = 16,9 \text{ кВт;}$$

$$\text{при } Q = 0,45 Q_n \quad P = \frac{1000 \cdot 0,0175 \cdot 37,2}{102 \cdot 0,76 \cdot 0,9} = 9,3 \text{ кВт.}$$

4. Расход электроэнергии за год

$$A = 16,9 \cdot 4000 + 9,3 \cdot 2000 = 86\,200 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

5. Если регулирование насосной установки будет проводиться изменением скорости насоса посредством регулируемого привода, то потери энергии, связанные с гашением части напора на задвижке, будут отсутствовать. Ориентировочно можно считать, что при регулировании изменением скорости рабочего колеса расход насоса пропорционален скорости, напор — скорости в квадрате, а мощность на валу насоса — скорости в кубе.

КПД регулируемого электропривода

$$\eta_{пр} = \eta_{дв} \eta_{п.ч},$$

где $\eta_{п.ч} = 0,95$ — КПД преобразователя частоты, питающего двигатель; $\eta_{пр} = 0,9 \cdot 0,95 = 0,855$.

Тогда:

при $Q = 0,9 Q_n \quad H = (0,9)^2 H_n = 0,9^2 \cdot 30 = 24,3$ м,

$$P = \frac{1000 \cdot 0,035 \cdot 24,3}{102 \cdot 0,76 \cdot 0,855} = 12,8 \text{ кВт;}$$

при $Q = 0,45 Q_n$ $H = (0,45)^2 H_n = 0,45^2 \cdot 30 = 6,0$ м,

$$P = \frac{1000 \cdot 0,0175 \cdot 6,0}{102 \cdot 0,76 \cdot 0,855} = 1,6 \text{ кВт.}$$

6. Годовой расход электроэнергии при использовании регулируемого электропривода

$$A = 12,8 \cdot 4000 + 1,6 \cdot 2000 = 54\,200 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

При использовании регулируемого электропривода насоса мощностью 15 кВт экономия электроэнергии

$$\Delta A = 86\,200 - 54\,200 = 32\,000 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Приведенный расчет является ориентировочным, однако он дает наглядное представление об эффективности использования регулируемого электропривода для насосных установок.

Контрольные вопросы

1. Назовите энергетические показатели электропривода.
2. Какая часть вырабатываемой электрической энергии расходуется на ее электромеханическое преобразование посредством электропривода?
3. Дайте определение постоянной времени нагрева электродвигателя.
4. Как зависит постоянная времени нагрева от способа охлаждения двигателя?
5. Какими параметрами определяется КПД силового полупроводникового преобразовательного устройства?
6. Как изменяется $\cos \varphi$ асинхронного двигателя при его недогрузке?
7. Чем определяется $\cos \varphi$ привода по системе «тиристорный преобразователь — двигатель постоянного тока»?
8. Из чего состоят переменные потери в нерегулируемом по скорости асинхронном электродвигателе?
9. Чему равны потери энергии в короткозамкнутом асинхронном двигателе и в синхронном двигателе при пуске вхолостую?
10. Дайте характеристику кратковременного режима работы S2.
11. Что такое относительная продолжительность включения ПВ?
12. Назовите действенный способ повышения эффективности использования электрической энергии в насосных установках.
13. Каковы основные направления энергосбережения посредством автоматизированного электропривода?

11.1. Общие требования, предъявляемые к электроприводу

Производственные машины и механизмы составляют основу большинства технологических процессов, используемых в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте, в коммунальном хозяйстве. Большинство производственных машин оснащено автоматизированным электроприводом и устройствами электроавтоматики.

Технологические процессы разнообразны по своему содержанию и областям использования. Также разнообразны производственные машины и механизмы, осуществляющие различные технологические процессы. Однако можно выделить группы машин и механизмов производственного назначения, характеризующиеся общностью выполняемых операций и принципом действия:

- турбомеханизмы: насосы, вентиляторы, турбокомпрессоры;
- грузоподъемные машины: краны, лифты, шахтные подъемники и др.;
- транспортные машины: конвейеры, эскалаторы и др.;
- металлообрабатывающие станки;
- машины возвратно-поступательного движения: поршневые насосы и компрессоры, прессы;
- экскаваторы;
- прокатные станы.

Здесь перечислены производственные машины, которые наиболее широко применяются в основных отраслях промышленности и поэтому могут быть названы типовыми производственными механизмами.

Основное влияние на режим работы электропривода и на требования, предъявляемые к нему, оказывает характер технологического процесса. По характеру технологического процесса все машины и механизмы можно разделить на две группы: механизмы непрерывного действия и механизмы циклического действия. В первой группе технологический процесс протекает непрерывно, во второй — технологический процесс состоит из однотипных повторяющихся циклов.

Электроприводы механизмов непрерывного действия характеризуются редкими пусками, не требуют, как правило, реверсирования и точного останова. Электроприводы механизмов циклического действия отличаются от них частыми пусками, реверсами и тем, что необходимы регулирование скорости и точный останов.

Требования к электроприводу устанавливают отдельно для каждого производственного механизма или для группы идентичных механизмов. Но есть общие требования, которые предъявляют к электроприводам всех механизмов:

- обеспечение заданного технологического процесса и требуемой производительности;

- обеспечение требуемых условий пуска и торможения производственных механизмов, а при необходимости — реверсирования и регулирования скорости;

- ограничение перегрузок — динамических и ударных;

- обеспечение требуемого уровня автоматизации (управление автоматическое, полуавтоматическое и т. п.);

- обеспечение надежности, которая, как правило, определяется заданной наработкой на отказ;

- конструктивная защищенность электрооборудования (степень защиты оболочек) в зависимости от условий окружающей среды, климатического исполнения;

- минимальные стоимость и затраты электроэнергии на работу электропривода;

- экологические: уровень шума и ограничение влияния электропривода на сеть питания, связанное с искажениями, вызываемыми высшими гармониками тока.

В требованиях указываются также параметры электроснабжения (величина напряжения, частоты, допустимые отклонения).

11.2. Последовательность проектирования электропривода

Последовательность проектирования электропривода обычно такая:

- разработка требований, предъявляемых к электроприводу;
- расчет статических нагрузок и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы движения рабочего органа производственного механизма;
- выбор системы электропривода на основании предварительного технико-экономического анализа;
- выбор типа привода (безредукторный или редукторный) и определение передаточного числа механической передачи;
- выбор типа приводного электродвигателя;

- предварительный выбор электродвигателя по мощности и номинальной скорости;
- расчет динамических нагрузок и построение нагрузочной диаграммы электропривода;
- проверка электродвигателя на нагрев, перегрузочную способность и по условиям пуска;
- выбор и расчет полупроводниковых преобразователей для питания электродвигателя;
- разработка функциональной и принципиальной схем электропривода;
- составление структурной схемы и расчет регуляторов системы автоматического регулирования;
- расчет или моделирование переходных процессов электропривода.

11.3. Нагрузочные диаграммы и тахограммы

Основой для выбора электропривода и расчета его мощности являются нагрузочные диаграммы и диаграмма скорости (тахограмма) (рис. 11.1). Нагрузочной диаграммой производственного

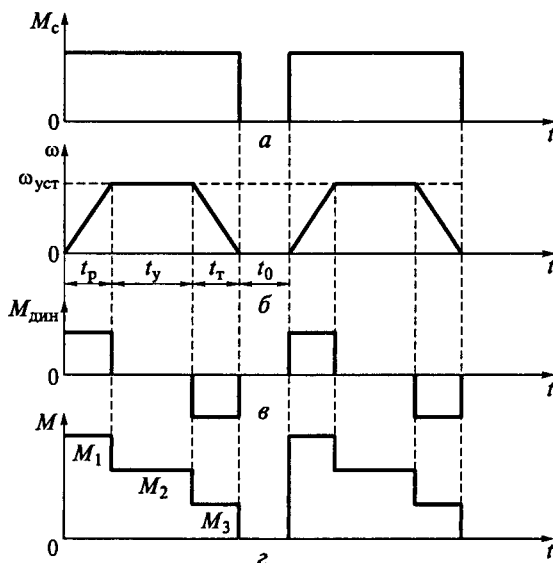


Рис. 11.1. Нагрузочные диаграммы и тахограмма:

a — нагрузочная диаграмма механизма; *б* — тахограмма; *в* — график динамического момента; *г* — нагрузочная диаграмма электропривода; t_p , t_y , t_T , t_0 — время соответственно разгона, установившегося движения, торможения и паузы; M_1 , M_2 , M_3 — моменты двигателя соответственно при разгоне, установившемся движении и торможении

механизма называют зависимость приведенного к валу двигателя момента сопротивления движению M_c (статического момента) от времени: $M_c = f(t)$. Эту диаграмму рассчитывают на основе данных, характеризующих работу машины (механизма).

Нагрузочная диаграмма электропривода — это зависимость момента, развиваемого двигателем от времени. Ее рассчитывают как алгебраическую сумму статического M_c и динамического $M_{дин}$ моментов: $M = M_c + M_{дин} = f(t)$. Тахограмма — это зависимость скорости рабочего органа машины или вала двигателя от времени: $\omega = f(t)$.

Реальные нагрузочные диаграммы могут существенно отличаться от расчетных. Это связано с различной загрузкой машин, опытом машиниста и многими другими факторами. Однако всегда можно выделить наиболее вероятные производственные циклы работы механизма, по которым и следует проводить расчет элементов электропривода.

Пример 11.1. Построить тахограмму движения и нагрузочные диаграммы механизма и привода подъема башенного крана. Цикл работы состоит из подъема груза массой $m = 500$ кг и спуска пустого крюка.

Технические данные: КПД передачи $\eta = 0,9$, радиус барабана $R_6 = 0,3$ м, номинальная скорость двигателя $\omega_n = 60$ с⁻¹, скорость подъема $v = 1$ м/с, скорость спуска крюка $v' = 2$ м/с (при ослабления поля двигателя). Момент инерции якоря двигателя и механизма (без груза), приведенный к валу двигателя, $J_{мех} = 0,2$ кг·м², высота подъема $h = 20$ м.

Решение. Найдем передаточное отношение от вала барабана к валу двигателя:

$$i = \frac{\omega_n R_6}{v} = \frac{60 \cdot 0,3}{1} = 18.$$

2. Статический момент на валу двигателя при подъеме груза

$$M_c = \frac{m_{тр} g R_6}{i \eta} = \frac{500 \cdot 9,81 \cdot 0,3}{18 \cdot 0,9} = 91 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент сопротивления движению при спуске крюка M'_c определяется моментом потерь в передаче. Принимаем

$$M'_c = 0,1 M_c = 9,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Найдем параметры тахограммы движения (рис. 11.2), полагая ускорение (a_1) и замедление (a_3) $a_1 = a_3 = 1,0$ м/с²:

$$t_1 = t_3 = \frac{v}{a_1} = \frac{1,0}{1,0} = 1 \text{ с}; \quad t_2 = \frac{h - 2 \cdot 0,5 v t_1}{v} = \frac{20 - 1 \cdot 1}{1} = 19 \text{ с};$$

$$t'_1 = t'_3 = \frac{v'}{a_1} = \frac{2,0}{1,0} = 2 \text{ с}; \quad t'_2 = \frac{20 - 2 \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot 2}{1} = 16 \text{ с}; \quad t_0 = 15 \text{ с}.$$

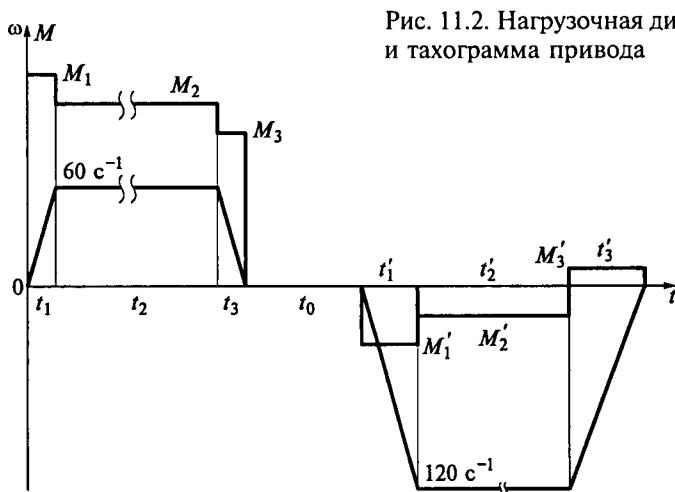


Рис. 11.2. Нагрузочная диаграмма и тахограмма привода

4. Приведенный к валу двигателя момент инерции груза

$$J_{\text{гр}} = \frac{m_{\text{гр}} R_6^2}{i^2} = \frac{500 \cdot 0,3^2}{18^2} = 0,014 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Суммарный момент инерции при подъеме груза

$$J_{\Sigma} = J_{\text{мех}} + J_{\text{гр}} = 0,2 + 0,014 = 0,214 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

5. Моменты на валу двигателя:
при подъеме груза:

$$M_1 = M_c + J_{\Sigma} \frac{\omega_n}{t_1} = 91 + 0,214 \frac{60}{1} = 103,8 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_2 = M_c = 91 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_3 = M_c - J_{\Sigma} \frac{\omega_n}{t_3} = 91 - 0,214 \frac{60}{1} = 78,2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

при спуске груза:

$$M'_1 = M'_c + J'_{\Sigma} \frac{\omega_n}{t_1} = -9,1 - 0,2 \frac{120}{2} = -21,1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M'_2 = M'_c = -9,1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M'_3 = M'_c - J'_{\Sigma} \frac{\omega_n}{t_3} = -9,1 + 0,2 \frac{120}{2} = 2,9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

В качестве примера на рис. 11.3 показаны тахограмма и нагрузочная диаграмма электропривода стола продольно-строгального станка [14]. Рабочий ход станка — прямой, во время которого

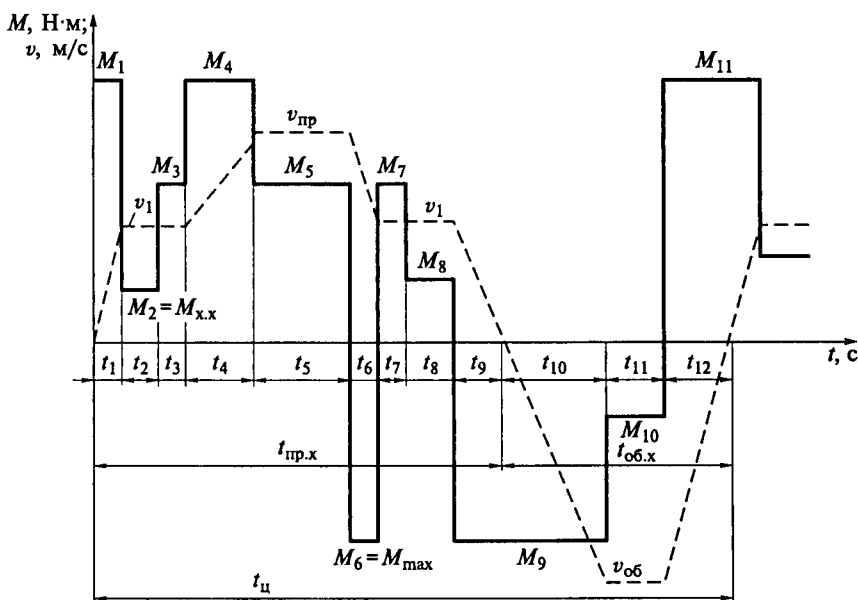


Рис. 11.3. Нагрузочная диаграмма и тахограмма прямого и обратного ходов электропривода главного движения продольно-строгального станка:

$v_{пр}$, $v_{об}$ — скорости соответственно прямого и обратного ходов; $t_{пр.х}$, $t_{об.х}$ — время соответственно прямого и обратного ходов; $t_{ц}$ — время цикла; $M_{х.х}$ — момент холостого хода

резец обрабатывает закрепленную на столе деталь. Обратный ход является холостым, поэтому его скорость принимают больше скорости холостого хода.

Работа станка начинается с разгона стола с обрабатываемой деталью до скорости v_1 (время t_1). При этом двигатель развивает максимально допустимый момент $M_1 = M_{max}$. Момент нагрузки в этом режиме равен $M_{с2}$, соответствующему силе $F_1 = \mu(G_c + G_d)$, где G_c , G_d — вес соответственно стола и детали; μ — коэффициент трения. Резец входит в деталь на установившейся скорости v_1 (время t_2). На участке t_2 скорость стола и двигателя постоянны. Скорость при врезании не должна превосходить заданного по условиям технологии значения.

На участке t_3 сила резания $F_3 = \mu(G_c + G_d + F_y) + F_z$ (F_z , F_y — составные силы резания соответственно по направлению движения и перпендикулярно к нему), а момент M_3 соответствует силе F_3 , резец соприкасается с деталью. Далее стол разгоняется до скорости прямого хода $v_{пр}$ под действием динамического момента $M_{дин} = M_{max} - M_3$, который существенно меньше динамического момента при разгоне стола до соприкосновения резца с деталью (время t_1).

На участке t_5 имеет место режим работы на установившейся скорости, когда $M_5 = M_3$. На участке t_6 осуществляется торможение привода стола до скорости v_1 , при которой резец выходит из детали. При торможении двигатель развивает максимальный момент $M_6 = M_{\max}$. На участке t_7 стол движется в прямом направлении со скоростью v_1 , при которой резец выходит из детали. Затем осуществляется реверс привода. Скорость движения стола в противоположном направлении $v_{об}$ выбирают в 2—3 раза больше, чем в прямом направлении. Разгон станка и его торможение производятся при максимальном моменте $M_{\max}$ двигателя. Сила на участках обратного хода обусловлена только трением в направляющих. По окончании обратного хода дается команда на разгон электродвигателя в прямом направлении.

11.4. Расчет мощности и выбор типа электродвигателя

При выборе приводного электродвигателя осуществляют:

- расчет мощности электродвигателя;
- расчет номинальной скорости и определение передаточного отношения механической передачи;
- выбор двигателя в соответствии с режимом его работы по условиям нагрузки;
- выбор двигателя по условиям пуска;
- определение необходимой степени защиты оболочки двигателя;
- выбор конструктивного исполнения на соответствие условиям окружающей среды;
- выбор системы охлаждения двигателя.

По условиям окружающей среды двигатели изготавливают в следующих климатических исполнениях: У, УХЛ, Т, М (соответственно для умеренного, умеренного и холодного, тропического и морского климата).

В зависимости от степени защиты персонала от соприкосновения с токоведущими и движущимися частями и попадания посторонних тел внутрь машины, а также от степени защиты от проникновения воды внутрь машины двигатели выпускают в следующих исполнениях:

1Р00 — открытые электрические двигатели, специальная защита отсутствует;

1Р10, 1Р20 — двигатели, защищенные от прикосновения и попадания посторонних предметов;

1Р11, ..., 1Р43 — двигатели, защищенные от капель воды, прикосновения и попадания посторонних предметов;

1Р44, ..., 1Р54 — закрытые двигатели, защищенные от брызг, прикосновения и попадания посторонних предметов;

1P55, ..., 1P58 — закрытые двигатели, защищенные от водяных струй (1P55) и проникновения воды внутрь при неограниченно длительном погружении в воду (1P58).

Кроме того, выпускают двигатели для работы во взрывоопасной среде и в особых условиях окружающей среды.

По способу охлаждения различают двигатели с естественным охлаждением, с самовентиляцией, имеющие вентилятор на валу двигателя (защищенные или закрытые), и с независимой вентиляцией.

Для электроприводов, предназначенных для работы в динамических режимах (механизмы циклического действия, следящие электроприводы и др.), используют двигатели с пониженным моментом инерции ротора (якоря). Для таких условий изготавливают малоинерционные двигатели. Для электроприводов с кривошипно-шатунной кинематикой применяют двигатели с повышенным моментом инерции. Для электроприводов, работающих в повторно-кратковременном режиме и неблагоприятных условиях эксплуатации, связанных с механическими нагрузками, воздействием повышенной влажности, температуры и пр., изготавливают двигатели специального конструктивного исполнения — краново-металлургических серий.

При выборе номинальных параметров электропривода необходимо выбрать передаточный коэффициент редуктора (или другой передачи), соединяющего вал электродвигателя с рабочим органом машины. Синхронные и асинхронные двигатели выпускают с высокими частотами вращения (синхронная частота обычно составляет 3000, 1500, 1000, 750, 600 мин⁻¹), в то время как скорость рабочего органа, как правило, требуется значительно ниже. Для снижения скорости и соответствующего повышения момента на валу рабочего органа необходимо использовать понижающую передачу (редуктор).

Следует иметь в виду, что масса, габаритные размеры электродвигателя (а следовательно, его стоимость) определяются не его номинальной мощностью, а номинальным моментом

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{30 P_n}{\pi n_n}, \quad (11.1)$$

где M_n — номинальный момент двигателя, Н·м; P_n — номинальная мощность двигателя, Вт; ω_n — номинальная скорость двигателя, с⁻¹; n_n — номинальная частота вращения, мин⁻¹.

Номинальный момент двигателя пропорционален объему активных частей электрической машины и принятым для этой машины электрическим и электромагнитным нагрузкам: допустимой плотности тока в обмотках j (А/мм²) и индукции в магнитопроводе B (Тл), т.е.

$$M_n = kD^2LjB,$$

где k — конструктивный коэффициент; D , L — диаметр и длина активной части ротора двигателя.

Приближенно можно считать, что габаритные размеры и масса активных частей двигателя пропорциональны номинальному моменту. Например, двигатель с номинальной частотой вращения (асинхронной) 750 мин^{-1} будет примерно в 4 раза больше по габаритным размерам активных частей и дороже, чем двигатель той же мощности, но с номинальной (синхронной) частотой вращения 3000 мин^{-1} . Исходя из этого конструктору при выборе кинематической схемы привода следует выбирать, чему отдать предпочтение: электродвигателю меньших массы и габаритных размеров, с редуктором, имеющим большое передаточное отношение, или большему по массе и габаритным размерам электродвигателю с более простым редуктором с меньшим передаточным отношением или вообще обойтись без механической передачи. Выбор осуществляют исходя из технико-экономических соображений и удобства компоновки конструкций рабочей машины в целом.

Для электроприводов малой и средней мощностей (до 200 кВт), как правило, применяют электроприводы с редуктором. Современным конструкторским решением является использование мотор-редукторов, в которых электродвигатель и редуктор объединены в один конструктивный узел.

Мощность приводного электродвигателя рассчитывают, исходя из трех условий:

нагрев двигателя во время работы должен быть не более допустимого для данного класса изоляции;

перегрузочная способность двигателя должна быть достаточной, чтобы обеспечивать кратковременно максимальные значения момента, определяемые, как правило, динамическими режимами пуска или торможения;

у приводов механизмов с большим моментом инерции или у механизмов с большим числом включений в час пусковые потери в двигателе не должны приводить к перегреву ротора.

Нагрев двигателя более допустимого приводит к ускорению старения изоляции и выходу двигателя из строя. Допустимая температура нагрева в зависимости от класса применяемой изоляции дана в табл. 11.1.

Расчеты температуры перегрева двигателя в соответствии с известной нагрузочной диаграммой весьма трудоемки. Наиболее точным методом является определение средних потерь энергии ΔP_{cp} в двигателе. Для каждой нагрузки определяют потери в двигателе и затем находят среднее значение потерь за цикл работы. Такой метод редко применяют из-за сложности расчета потерь. Поэтому

Таблица 11.1. Допустимые температура нагрева и превышение температуры электродвигателя для различных классов изоляции

Параметр	Класс изоляции			
	Е	В	Ф	Н
Допустимая температура нагрева изоляционного материала, °С	120	135	155	180
Допустимая температура нагрева обмоток электродвигателя, °С	—	120	140	165
Допустимое превышение температуры, °С	75	80	100	125

на практике пользуются косвенными методами оценки нагрева двигателя. Наиболее часто применяют методы определения эквивалентных величин: тока, момента или мощности.

Метод эквивалентного тока. Потери в двигателях примерно пропорциональны току в квадрате. Зная график тока, протекающего по обмоткам двигателя, можно определить для каждого конкретного режима работы значение эквивалентного тока I_3 , характеризующее его нагрев.

Эквивалентный ток I_3 — это такой ток с постоянным значением, который вызывает такой же нагрев электродвигателя, как и реально протекающий ток с изменяющимся значением в соответствии с графиком нагрузки механизма:

$$I_3 = \sqrt{\frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} i^2 dt} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}}, \quad (11.2)$$

где t_u — время цикла; $I_1, I_2, \dots, I_n$ — ток соответственно в течение времени $t_1, t_2, \dots, t_n$.

Условие проверки двигателя на нагрев такое:

$$I_3 \leq I_n, \quad (11.3)$$

где I_n — номинальный ток двигателя.

Метод эквивалентного тока дает достаточно достоверные результаты, если сохраняется постоянство сопротивлений двигателя и потерь в стали независимо от нагрузки.

Метод эквивалентного момента. Если момент двигателя пропорционален току, то можно пользоваться методом эквивалентного момента.

Эквивалентный момент M_3 — это постоянный момент нагрузки, который вызывает такой же нагрев двигателя, как и реально изменяющийся момент в соответствии с графиком работы механизма:

$$M_3 = \sqrt{\frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} M^2 dt} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0}}, \quad (11.4)$$

где $M_1, M_2, \dots, M_n$ — момент соответственно в течение времени $t_1, t_2, \dots, t_n$.

Условие правильности выбора двигателя $M_3 \leq M_n$, где M_n — номинальный момент двигателя.

Этот метод применим для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением, для асинхронных двигателей и других, у которых момент пропорционален току и соблюдены условия, указанные для метода эквивалентного момента.

Метод эквивалентной мощности. Если скорость двигателя изменяется мало и можно считать, что мощность пропорциональна моменту и, следовательно, току, то эквивалентная мощность

$$P_3 = \sqrt{\frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} P^2 dt} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}}, \quad (11.5)$$

где $P_1, P_2, \dots, P_n$ — мощность соответственно в течение времени $t_1, t_2, \dots, t_n$.

Производить проверку двигателя на нагрев по эквивалентной мощности можно для нерегулируемых по скорости электродвигателей, у которых момент пропорционален току. Условие правильности выбора электродвигателя такое: $P_3 \leq P_n$.

Формулы (11.2), (11.4), (11.5) не учитывают условий ухудшения охлаждения у двигателей с самовентиляцией во время пауз и при сниженной скорости. Для учета этого фактора можно пользоваться более точной формулой, например, для эквивалентного тока:

$$I_3 = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{\beta_1 t_1 + \beta_2 t_2 + \dots + \beta_n t_n + \beta_0 t_0}},$$

где $\beta_1 = 0,5$ — коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения в процессе разгона и торможения двигателя; $\beta_2 = 0,8 \dots 1,0$ — коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения при работе с постоянной скоростью; $\beta_0 = 0,3$ — коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения при стоянке двигателя в течение времени t_0 .

Пример 11.2. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения работает в режиме, характеризующемся нагрузочной диаграммой, представленной на рис. 11.1.

Технические данные двигателя: $M_1 = 160 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_2 = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_3 = 40 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $t_1 = t_3 = 10 \text{ с}$; $t_2 = 60 \text{ с}$; $t_0 = 20 \text{ с}$; $\omega_{\max} = 104,5 \text{ с}^{-1}$. Циклы повторяются, т.е. можно считать режим работы продолжительным.

Задача — определить требуемую мощность двигателя по условиям нагрева.

Решение. Так как двигатель работает с постоянным номинальным потоком возбуждения, то можно воспользоваться методом эквивалентного момента.

Эквивалентный момент

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{\beta_1 t_1 + t_2 + \beta_1 t_3 + \beta_0 t_0}} = \sqrt{\frac{160^2 \cdot 10 + 100^2 \cdot 60 + 40^2 \cdot 10}{0,5 \cdot 10 + 60 + 0,5 \cdot 10 + 0,3 \cdot 20}} = 107,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Необходимо, чтобы номинальная мощность двигателя

$$P_n \geq M_3 \omega_{\max} = 11,2 \text{ кВт}.$$

Нагрев двигателя в значительной степени зависит от режима работы двигателя. Если двигатель работает в продолжительном режиме, то динамическая составляющая момента обычно мало сказывается на нагреве двигателя и определять его мощность можно исходя из статического момента.

Если двигатель работает в режиме частых пусков и остановов, то динамическая составляющая момента может иметь существенное значение. В этом случае приходится сначала проводить предварительный выбор двигателя из условия $M = (1,25 \dots 1,3) M_c$ и затем проверять его на нагрев, пользуясь одним из приведенных методов. Предварительный выбор двигателя необходим, чтобы знать его момент инерции для расчета динамической составляющей момента. Порядок расчета мощности двигателя зависит от режима его работы.

Продолжительный режим (S1). 1. Определяют мощность производственного механизма, причем если нагрузка за время работы изменяется, то определяют эквивалентную мощность (момент или ток):

$$P = \frac{F v_n \cdot 10^{-3}}{\eta_n} = \frac{M \omega_n \cdot 10^{-3}}{\eta_n}, \quad (11.6)$$

где F — сила, приведенная к валу двигателя, Н; M — момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, Н·м; v_n — номинальная линейная скорость механизма, м/с; ω_n — номинальная скорость двигателя, с^{-1} ; η_n — КПД передачи.

2. По каталогу выбирают электродвигатель исходя из условия

$$P_{n.\text{дв}} \geq K_3 P, \quad (11.7)$$

где $P_{н.дв}$ — номинальная мощность электродвигателя по каталогу; $K_3 = 1,05 \dots 1,2$ — коэффициент запаса, учитывающий погрешности расчета сил сопротивления.

3. Электродвигатель при необходимости проверяют на перегрузочную способность по условиям пуска:

$$M_{\max} \geq K_3(M_c + M_d) = K_3(M_c + J_\Sigma \frac{\omega_n}{t_n}), \quad (11.8)$$

где M_c , M_d — соответственно статический и динамический моменты сопротивления, Н·м; J_Σ — приведенный к валу электродвигателя суммарный момент инерции, кг·м²; t_n — время пуска.

Асинхронные короткозамкнутые электродвигатели проверяют по пусковому моменту $M_n \geq (M_{c.n} K_3) M_{c.n}$ — момент сопротивления при скорости, равной нулю.

Кратковременный режим (S2). 1. Определяют мощность (момент) нагрузки и время работы электродвигателя. Если нагрузка за время работы изменяется, то определяют эквивалентную мощность (момент).

2. Для некоторых серий электродвигателей указывают допустимую мощность при стандартных значениях продолжительности рабочего периода 10, 30, 60, 90 мин. Если время работы t_p не совпадает со стандартным, выбирают двигатель по ближайшему большему значению времени работы. Обязательна проверка двигателя по перегрузочной способности.

3. Если двигатель рассчитан на продолжительный режим работы, при кратковременном режиме его можно перегружать. Для количественной оценки возможности перегрузки используют коэффициент механической перегрузки p_m — отношение мощности нагрузки двигателя в кратковременном режиме P_k к номинальной мощности P_n в продолжительном режиме

$$p_m = \frac{P_k}{P_n} = \sqrt{\frac{1+a}{1-e^{-t_p/T_n}}} + a,$$

где $a = K/V_n$ — отношение постоянных потерь K к номинальным переменным потерям в двигателе V_n .

Если $t_p/T_n \leq 0,35$ (T_n — постоянная времени нагрева), электродвигатель проверяют только по перегрузочной способности.

Повторно-кратковременный режим (S3). 1. Определяют мощность (момент), время работы и пауз каждой операции в цикле.

2. Строят нагрузочную диаграмму и тахограмму.

3. Если нагрузка переменная, то определяют эквивалентный момент или ток.

4. Определяют относительную продолжительность работы:

$$ПВ_p = \frac{\sum t_p}{\sum t_p + \sum t_n} 100, \quad (11.9)$$

где $\sum t_p, \sum t_n$ — сумма времени соответственно работы и пауз, если в цикле несколько операций.

5. Если $PВ_p = PВ_{ст}$ ($PВ$ — стандартная относительная продолжительность работы), то при соответствующей $PВ_{ст}$ (%) выбирают электродвигатель из условия $P_{ндв} \geq K_3 P_{э,ст}$, где $P_{ндв}$ — номинальная мощность двигателя; $P_{э,ст}$ — мощность двигателя по каталогу при $PВ_{ст}$.

Если расчетная $PВ$ не соответствует стандартной, эквивалентную мощность приводят к стандартной по формуле

$$P_{э,ст} = P_{э,р} \sqrt{\frac{PВ_p}{PВ_{ст}}}. \quad (11.10)$$

Пример 11.3. Электропривод работает в повторно-кратковременном режиме. Цикл работы включает в себя работу в течение $t_p = 2,5$ мин с моментом на валу $M = 300$ Н·м и скоростью $73,3$ с⁻¹ и паузы в течение $t_n = 5$ мин.

Задача — выбрать для этих условий асинхронный электродвигатель краново-металлургической серии.

Решение. 1. Относительная продолжительность включения

$$PВ = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100 = \frac{2,5 \cdot 100}{2,5 + 5} = 33,3 \, \%.$$

2. Мощность на валу

$$P = M\omega = 300 \cdot 73,3 = 22 \text{ кВт}.$$

3. Приведем реальное значение мощности к стандартному значению $P_{ст}$ при $PВ_{ст} = 25 \, \%$:

$$P_{ст} = P \sqrt{\frac{PВ}{PВ_{ст}}} = 22 \sqrt{\frac{33,3}{25}} = 25,3 \text{ кВт}.$$

По условиям задачи выбираем двигатель МТКВ-51108, имеющий номинальную мощность 28 кВт при $PВ_{ст} = 25 \, \%$.

Для регулируемых электроприводов после выбора двигателя осуществляют выбор полупроводникового преобразователя: управляемого выпрямителя для приводов ТП—Д или преобразователя частоты для приводов ПЧ—АД.

Полупроводниковые преобразователи выбирают, как правило, по току и напряжению. Особенность выбора преобразователей по току заключается в том, что полупроводниковые приборы имеют очень малые постоянные времени нагрева, вследствие чего преобразователи следует, как правило, выбирать не по эквивалентному току двигателя, а по его максимальному значению.

11.5. Основные системы регулируемого электропривода

Важнейшим вопросом при проектировании является выбор типа электропривода. При этом нужно всегда иметь в виду те преимущества, которые дает применение регулируемого электропривода: автоматизация процессов, технологическая гибкость, энергосбережение и др.

Развитие систем регулируемого электропривода исторически было связано с развитием преобразовательной техники. В настоящее время все системы регулируемого электропривода выполняют на основе силовых полупроводниковых преобразователей, построенных на управляемых полупроводниковых приборах. В табл. 11.2 приведены основные характеристики наиболее распространенных систем регулируемого электропривода.

Таблица 11.2. Основные характеристики систем регулируемого электропривода

Тип регулируемого электропривода	Мощность, кВт	Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	Диапазон регулирования	Области использования
Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы				
На базе низковольтных (380 В) асинхронных короткозамкнутых двигателей общего применения и транзисторных преобразователей частоты	0,5 ... 250	До 3000	20 : 1	Различные технологические машины и оборудование, насосы, вентиляторы и др.
На базе специальных асинхронных двигателей и транзисторных преобразователей частоты	1,0 ... 100	До 12 000	1000 : 1	Электроприводы главного движения металлорежущих и других станков, текстильное оборудование, центрифуги
На базе интегрированных конструкций (электрошпиндели, электроверетена)	0,1 ... 60	До 50 000	400 : 1	Металлорежущие станки, текстильное оборудование, центрифуги

Тип регулируемого электропривода	Мощность, кВт	Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	Диапазон регулирования	Области использования
На базе асинхронных двигателей напряжением до 6000 В и транзисторных преобразователей частоты	500...3000	До 3000	20 : 1	Насосы, вентиляторы, различного технологического оборудование
На базе высоковольтных асинхронных двигателей и тиристорных преобразователей частоты	До 8000	До 3000	20 : 1	Различные технологические машины и оборудование, насосы, турбокомпрессоры, вентиляторы
Вентильные двигатели (бесщеточные электрические машины постоянного тока)				
На базе синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов и транзисторных коммутаторов	0,1...50	До 6000	10 000 : 1 и выше	Приводы подачи металлорежущих станков, роботы и другое высокоточное оборудование
На базе высоковольтных синхронных двигателей и тиристорных коммутаторов	400...10 000	До 3000	10 : 1	Насосы, турбокомпрессоры, горное и металлургическое оборудование
Электроприводы постоянного тока с питанием от управляемого полупроводникового выпрямителя				
На базе высокомоментных двигателей постоянного тока или транзисторных широтно-импульсных управляемых преобразователей	0,5...30	До 1500	10 000 : 1	Электроприводы металлорежущих и других станков, различного высокоточное оборудование

Тип регулируемого электропривода	Мощность, кВт	Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	Диапазон регулирования	Области использования
На базе двигателей постоянного тока общего применения и тиристорных преобразователей	1,0... 1000	До 1500	100 : 1	Различное технологическое оборудование, краны, подъемные машины
На базе двигателей постоянного тока индивидуального исполнения и тиристорных преобразователей	1000... 10 000	До 1000	100 : 1	Металлургическое, горное и другое технологическое оборудование
Асинхронный вентильный каскад (АВ) на базе асинхронных двигателей с фазным ротором и тиристорных преобразователей	250... 2000	До 1500	2 : 1	Электроприводы насосов и вентиляторов

11.6. Комплектные электроприводы

Регулируемые электроприводы выпускают промышленные предприятия в виде комплектных электроприводов. Такой привод представляет собой конструктивно законченное устройство, содержащее полупроводниковый преобразователь, системы управления и регулирования, защитную аппаратуру. Этот привод в комплекте с приводным электродвигателем представляет собой комплектный электропривод.

Выпускают большое число типов комплектных электроприводов. В данном подразделе более подробно рассмотрены два типа наиболее распространенных электроприводов отечественного производства.

Комплектные электроприводы унифицированные трехфазные ЭПУ-1М. Устройства управления предназначены для управления двигателями постоянного тока мощностью до 250 кВт. Двигатели могут иметь возбуждение от постоянных магнитов или с электро-

магнитным возбуждением. В состав комплекта ЭПУ-1М входят тиристорный (нереверсивный или реверсивный) управляемый выпрямитель и полупроводниковая система регулирования. Электроприводы ЭПУ-1М предназначены для применения в металло-режущих и деревообрабатывающих станках (электроприводы главного движения и электроприводы подачи), механизмах металлургического производства, бумагоделательных машинах, машинах по производству пленок, переработке пластмасс и других производственных машинах и механизмах, у которых требуется регулировать скорость в широком диапазоне.

Структура обозначения электропривода:

ЭПУ-1М-Х-ХХ-Х-Х-Х-Х

Структура расшифровывается следующим образом:

ЭПУ-1М — электропривод постоянного тока унифицированной первой модели, модифицированный;

первая цифра (Х) — 1 — нереверсивный; 2 — реверсивный;

вторая и третья цифры — исполнение по номинальному току якоря двигателя: 34-25 А; 37-50 А; 39-80 А; 40-100 А; 43-200 А; 46-400 А; 48-630 А;

четвертая цифра — выпрямленное напряжение: 1-115 В; 2-230 В; 3-460 В;

пятая цифра — напряжение трехфазной питающей сети: 4-220 В; 7-380 В;

шестая цифра — функциональная характеристика: П — для электроприводов подач с диапазоном регулирования скорости $D \leq 10\,000 : 1$; Д — для электроприводов главного движения с двухзонным регулированием скорости с диапазоном $D \leq 1000 : 1$; М — с однозонным регулированием с обратной связью по скорости с диапазоном $D \leq 1000 : 1$.

Устройство управления электропривода ЭПУ-1М в комплекте с защитной и коммутационной аппаратурой предназначено для встраивания в шкафы управления со степенью защиты IP-21. Конструктивно устройство управления выполнено в виде моноблока.

Функциональная схема электропривода ЭПУ-1М-2П рассматриваемой серии показана на рис. 11.4. Это высокоточный реверсивный трехфазный тиристорный однозонный электропривод по системе ТП—Д. Понятие «однозонный» означает, что регулирование скорости осуществляется в пределах $0 - \omega_{ном}$, т.е. в сторону уменьшения номинальной скорости. Поток возбуждения двигателя остается постоянным.

На двигатель постоянного тока *М* питание поступает от реверсивного тиристорного преобразователя *УЗ1*, выполненного по трехфазной мостовой схеме с отдельным управлением (см. подразд. 5.2). Питание на тиристорный преобразователь подается от сети 380 В, если двигатель имеет номинальное напряжение 440 В, или от трансформатора *Т1*, если напряжение двигателя 220 В. Для

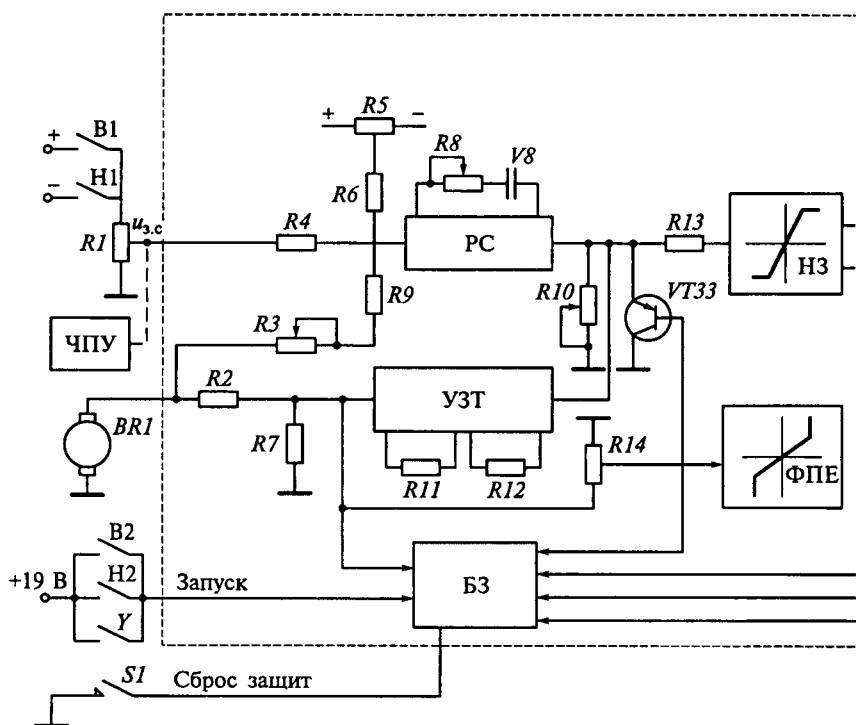
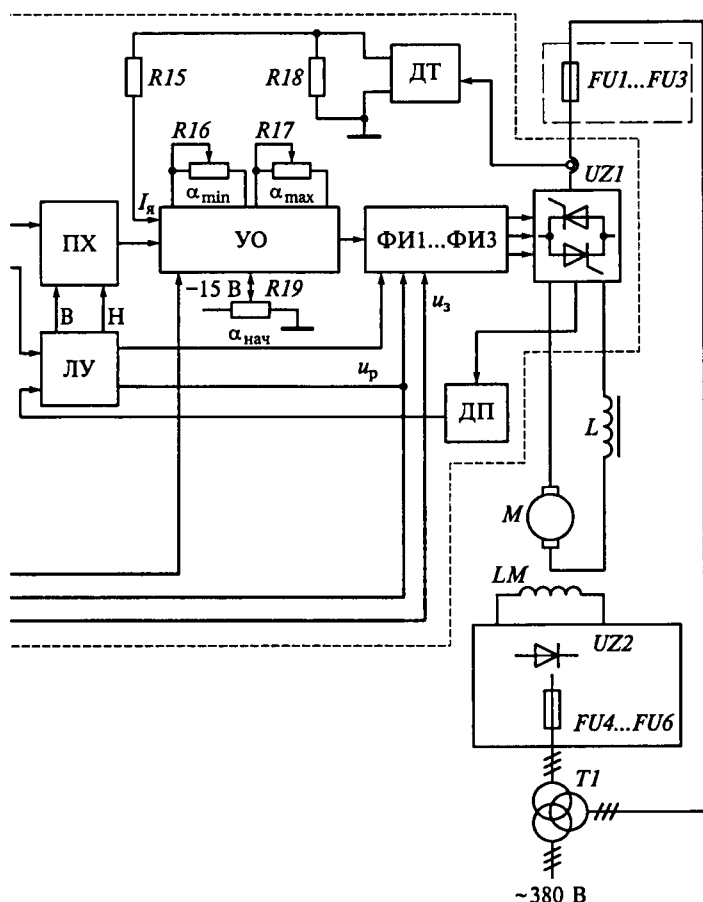


Рис. 11.4. Функциональная схема электропривода ЭПУ-1М-2П:

РС — регулятор скорости; УЗТ — устройство задания тока; БЗ — блок защит; ПХ — переключатель характеристик; ФИ1...ФИ3 — фазоимпульсный преобразователь; ДП — датчик проводимости; L — дроссель; ЛУ — логическое устройство; ФПЕ — функциональный преобразователь

двигателей с электромагнитным возбуждением предусмотрен выпрямитель $UZ2$ для питания обмотки возбуждения. Защита преобразователей $UZ1$ и $UZ2$ выполняется плавкими предохранителями $FU1...FU3$ и $FU4...FU6$.

Система регулирования скорости — двухконтурная. Внешний контур — контур скорости — содержит ПИ-регулятор скорости РС и обратную связь по скорости от тахогенератора $BR1$. Обратная связь по току заведена на вход управляющего органа УО. Измерительным элементом для обратной связи по току служит трансформатор тока, включенный в цепь переменного тока, с которой питание поступает на преобразователь цепи якоря. Ток вторичной обмотки этого трансформатора преобразуется датчиком тока ДТ в сигнал постоянного тока, пропорциональный по величине току якоря двигателя. Однако этот сигнал однополярный, т.е. не несет информацию о направлении тока в цепи якоря.



Управление тиристорами выполняется от трехканальной системы импульсно-фазового управления СИФУ, содержащей формирователи импульсов ФИ1...ФИ3. Управляющий сигнал формируется управляющим органом УО; с помощью переменных резисторов $R16$, $R17$ и $R19$ проводится установка углов $\alpha_{\min}$, $\alpha_{\max}$ и начального угла $\alpha_{\text{нач}}$. Переключение импульсов управления с одной группы тириستоров (В) на другую группу (Н) осуществляется логическим устройством, которое работает в зависимости от знаков сигнала заданного тока и сигнала датчика проводимости вентилей ДП. Сигнал заданного направления тока поступает в логическое устройство с выхода нелинейного звена НЗ. Нелинейное звено НЗ и функциональный преобразователь ЭДС ФПЕ с резистором $R14$ образуют устройство для линеаризации характеристик электропривода при работе в зоне прерывистых токов.

Для согласования реверсивного сигнала на выходе НЗ с нереверсивной регулировочной характеристикой управляющего органа УО служит переключатель характеристик ПХ, управляемый логическим устройством ЛУ (ключи В и Н).

На входе регулятора скорости сравниваются сигналы задания скорости и обратной связи по скорости. Вместо ручного потенциометрического резистора $R1$ задание может вводиться от устройства высшего уровня автоматизации, например от ЧПУ.

Токоограничение в данной схеме обеспечивается посредством ограничения выходного напряжения регулятора скорости с помощью резистора $R10$, который устанавливает максимальную уставку токоограничения. Узел зависимого токоограничения обеспечивает снижение максимальной уставки токоограничения в зависимости от скорости: чем больше скорость, тем меньше допустимая перегрузка по току.

Блок защит БЗ проводит блокирование выхода регулятора скорости и снятие управляющих импульсов с тиристоров.

Электроприводы ЭПУ-1М выпускает ОАО «Чебоксарский электроаппаратный завод».

Комплектные частотно-регулируемые асинхронные приводы серии АП-140. Промышленная группа «Приводная техника» выпускает регулируемые асинхронные электроприводы серии АП-140 двух видов:

АП-140-А — для управления общепромышленными асинхронными двигателями мощностью 5,5... 500 кВт;

АП-140-Н — для управления асинхронными электродвигателями насосов и вентиляторов мощностью 5,5... 500 кВт.

Характеристики электроприводов серии АП-140 приведены в табл. 11.3.

Питание преобразователей — от трехфазной сети 380 В. Структурная схема преобразователя частоты представлена на рис. 11.5. Преобразователь состоит из следующих основных частей: звена постоянного тока ЗПТ, содержащего неуправляемый выпрямитель с фильтром (рис. 11.6); мостового трехфазного инвертора, выполненного на IGBT-приборах (рис. 11.7); системы управления; блока питания БП; датчиков тока ДТ. Выпрямитель осуществляет преобразование трехфазного переменного напряжения сети питания в выпрямленное напряжение постоянной амплитуды 540 В.

Инвертор посредством широтно-импульсного модулирования управления транзисторными ключами преобразует постоянное напряжение в переменное квазисинусоидальное регулируемой частоты f и амплитуды U . Через цепь постоянного тока передается активная мощность из сети к двигателю. Для циркуляции реактивной мощности, которая необходима для создания электромагнитного поля асинхронного двигателя, образуется цепь: обмотки ста-

Таблица 11.3. Характеристики электроприводов серии АП-140

Характеристи- ка	Модель									
	0K75	1K5	2K2	3K7	5K5	7K5	11K	15K	18K5	22K
Мощность, кВт	0,75	1,5	2,2	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22
Номиналь- ный ток, А	2,5	3,7	5	8,5	13	16	25	32	38	45
Характеристи- ка	Модель									
	30K	37K	45K	55K	75K	93K	110K	132K	160K	187K
Мощность (кВт)	30	37	45	55	75	93	110	132	160	187
Номиналь- ный ток (А)	60	75	90	110	150	170	210	250	300	340
Характеристи- ка	Модель									
	200K	220K	250K	280K	315K	375K	400K	500K		
Мощность, кВт	200	220	250	280	315	375	400	500		
Номиналь- ный ток, А	380	415	470	520	600	680	750	920		

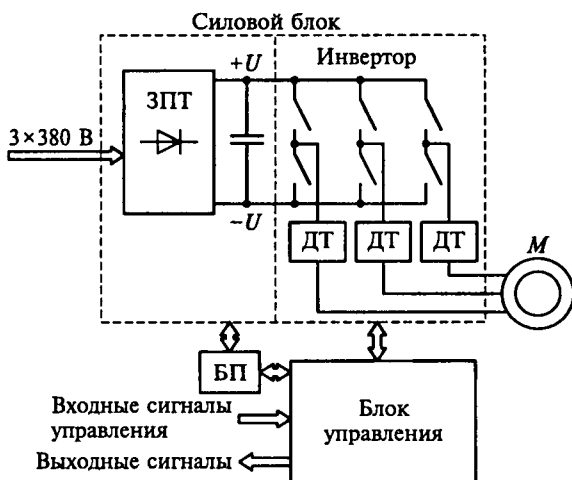


Рис. 11.5. Структурная схема преобразователей частоты АП-140

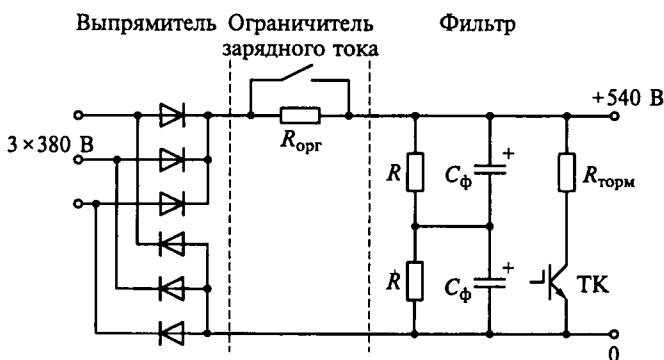


Рис. 11.6. Принципиальная схема звена постоянного тока (ЗПТ) преобразователя частоты АП-140:

$R_{огр}$ — резистор ограничения тока заряда конденсатора; $R_{торм}$ — тормозной резистор; ТК — транзисторный ключ; $C_ф$ — конденсатор фильтра

тора двигателя — обратные диоды, шунтирующие транзисторные ключи — конденсаторы фильтра. При запираии ключей индуктивные токи замыкаются через диоды на конденсатор фильтра, не вызывая перенапряжений.

Транзисторные ключи управляются драйверами, которые осуществляют гальваническую развязку силовых цепей от цепей управления и защиту транзисторов.

Блок микропроцессорного управления включает в себя (рис. 11.8) программируемый контроллер (ПК), аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи и пульт управления. Контроллер осуществляет широтно-импульсную модуляцию выходного напряжения преобразователя, у которого амплитуда напряжения зависит от частоты (рис. 11.9):

$$U = A + Bf,$$

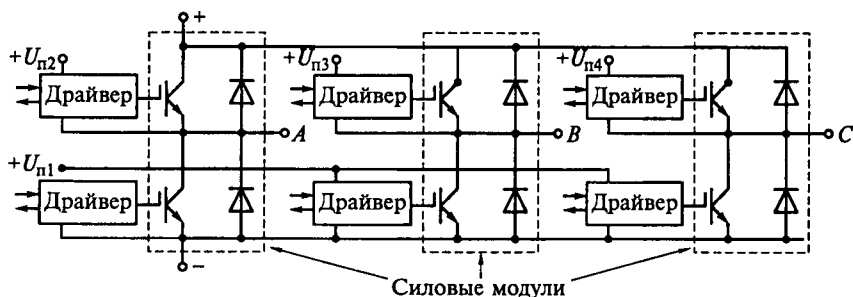


Рис. 11.7. Принципиальная схема мостового трехфазного инвертора на IGBT-транзисторах:

$U_{n1}, \dots, U_{n4}$ — напряжение питания цепей управления

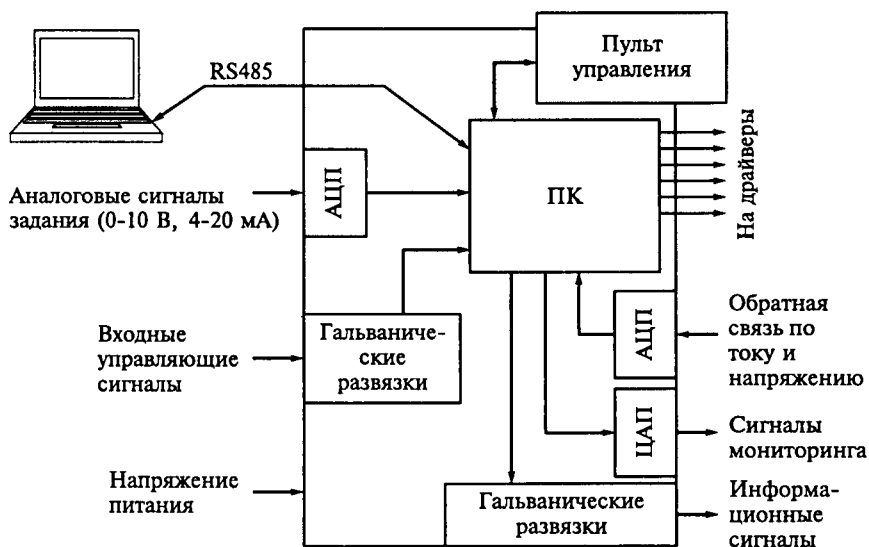


Рис. 11.8. Функциональная схема блока управления электропривода АП-140

где A и B — коэффициенты, которые программируются.

В контроллере может быть программно реализован пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор технологического параметра (например, напора или расхода воды), который должен контролировать регулируемый электропривод. Сигналы обратной связи по этому параметру вводятся в контроллер через АЦП.

Все параметры, связанные с управлением приводом, заносятся в память контроллера с помощью программирующего устройства или персонального компьютера через интерфейс RS485.

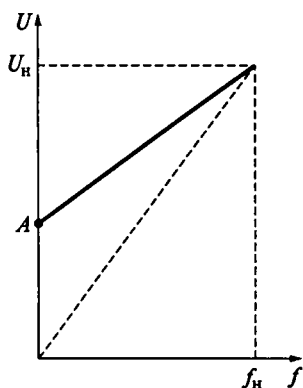


Рис. 11.9. Зависимость напряжения от частоты преобразователя:

U_n, f_n — номинальные соответственно напряжение и частота преобразователя

При необходимости преобразователь АП-140 может обеспечить тормозной режим работы электропривода. Для этого в цепи постоянного тока предусмотрены транзисторный ключ ТК (см. рис. 11.6) и тормозной разрядный резистор $R_{\text{торм}}$. Энергия торможения двигателя накапливается на конденсаторе фильтра $C_{\text{ф}}$, повышая на нем напряжение. Когда напряжение на $C_{\text{ф}}$ достигнет определенного значения, открывается ключ ТК и конденсатор разряжается на тормозной резистор $R_{\text{торм}}$. Резистор $R_{\text{огр}}$ в цепи постоянного тока служит для ограничения тока заряда конденсатора фильтра при включении преобразователя в сеть. При дальнейшей работе резистор $R_{\text{огр}}$ шунтируется.

Преобразователи АП-140 имеют различные виды защиты от влияния следующих факторов:

- перенапряжений по питанию;
- повышения напряжения питания;
- понижения напряжения питания;
- короткого замыкания в нагрузке;
- замыкания фазы на землю;
- перегрева двигателя;
- «опрокидывания» двигателя;
- перегрузки;
- ошибок управления.

Контрольные вопросы

1. Назовите общие требования, предъявляемые к электроприводу.
2. Что характеризует нагрузочная диаграмма электропривода?
3. Чем отличается нагрузочная диаграмма производственного механизма от нагрузочной диаграммы электропривода?
4. По каким критериям рассчитывают мощность приводного электродвигателя?
5. От какого номинального параметра электродвигателя зависят его масса и габаритные размеры?
6. Перечислите классы изоляции двигателя и соответствующие им значения температуры нагрева.
7. Дайте определение эквивалентного тока двигателя.
8. Каким параметром характеризуется повторно-кратковременный режим работы двигателя?
9. По каким параметрам выбирают полупроводниковые преобразователи для питания электродвигателя в системах регулируемого электропривода?
10. Какова последовательность этапов проектирования электропривода?
11. Почему следует использовать регулируемые электроприводы?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный электропривод производственных механизмов / под общ. ред. Г. Б. Онищенко. — М. : РАСНХ, 2001. — 520 с.
2. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учеб. для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. — М. : Издательский центр «Академия», 2004. — 576 с.
3. ГОСТ 50369. Электроприводы. Термины и определения. — М. : Изд-во стандартов, 1993.
4. Зимин Е. Н. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями / Е. Н. Зимин, В. Л. Кацевич, С. К. Козырев. — М. : Энергоатомиздат, 1981. — 192 с.
5. Ильинский Н. Ф. Основы электропривода / Н. Ф. Ильинский. — М. : Изд-во МЭИ, 2000. — 162 с.
6. Ключев В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных установок / В. И. Ключев, В. Н. Терехов. — М. : Энергия, 1980. — 360 с.
7. Ключев В. И. Теория электропривода : учеб. для вузов / В. И. Ключев. — М. : Энергоатомиздат, 2001. — 704 с.
8. Ковчин С. А. Основы электропривода / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. — СПб. : Энергоатомиздат, 1994. — 496 с.
9. Комплектные тиристорные электроприводы: справочник ; под ред. В. М. Перельмутера. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 319 с.
10. Микропроцессорные автоматические системы регулирования. Основы теории и элементы : учеб. пособие / В. В. Солодовников, В. Г. Коньков, В. Л. Суханов, О. В. Шевяков. — М. : Высш. шк., 1991. — 255 с.
11. Москаленко В. В. Автоматизированный электропривод / В. В. Москаленко. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 416 с.
12. Москаленко В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. — М. : Высш. шк., 1991. — 430 с.
13. Правила устройства электроустановок : Минэнерго РФ. — М. : Энергоатомиздат, 2002. — 600 с.
14. Справочник по автоматизированному электроприводу ; под ред. В. А. Алексеева и А. В. Шинянского. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 616 с.
15. Терехов В. М. Системы управления электроприводов : учеб. для вузов / В. М. Терехов, О. Н. Осипов. — М. : Издательский центр «Академия», 2005. — 304 с.
16. Терехов В. М. Элементы автоматизированного электропривода / В. М. Терехов. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 22 с.
17. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. — М. : Энергоатомиздат, 1981. — 576 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Общие сведения об электроприводе	4
1.1. Назначение и функции электропривода	4
1.2. Роль электропривода в современных машинных технологиях	10
1.3. Структура электропривода	12
1.4. Классификация электроприводов	17
Глава 2. Основы механики электропривода	22
2.1. Механические характеристики двигателя и рабочего механизма	22
2.2. Двигательный и тормозной режимы работы электродвигателя	27
2.3. Уравнение движения электропривода	29
2.4. Приведенное механическое звено	33
Глава 3. Электромеханические свойства двигателей переменного тока	41
3.1. Общие сведения	41
3.2. Электромеханические свойства асинхронных двигателей	43
3.2.1. Принцип работы асинхронного двигателя	43
3.2.2. Механические характеристики асинхронного двигателя ...	47
3.2.3. Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором	54
3.2.4. Особенности характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором	58
3.2.5. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя при работе в двигательном режиме	61
3.2.6. Изменение напряжения питания асинхронного двигателя	63
3.2.7. Тормозные режимы асинхронных двигателей	66
3.2.8. Электромеханические характеристики многоскоростных асинхронных двигателей	73
3.3. Электромеханические характеристики синхронных двигателей	75
3.3.1. Принцип работы синхронного двигателя	75
3.3.2. Режимы работы синхронного двигателя	80
3.3.3. Регулирование тока возбуждения синхронного двигателя	82
3.4. Однофазные асинхронные двигатели	86
Глава 4. Общие сведения о регулировании электропривода	89
4.1. Регулируемый электропривод — основной вид автоматизированного электропривода	89

4.2. Показатели качества регулирования скорости	91
Глава 5. Регулируемые электроприводы с двигателями постоянного тока	100
5.1. Электромеханические характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения	100
5.2. Электроприводы по системе «тиристорный преобразователь — двигатель постоянного тока»	110
5.3. Электроприводы с двигателями постоянного тока с последовательным возбуждением	123
5.4. Электроприводы постоянного тока с широтно-импульсным регулированием	130
Глава 6. Регулируемые электроприводы с двигателями переменного тока	138
6.1. Способы регулирования асинхронного двигателя	138
6.2. Асинхронные электроприводы с частотным регулированием скорости	141
6.3. Электроприводы по системе «преобразователь частоты с непосредственной связью — асинхронный двигатель»	148
6.4. Электроприводы по системе «преобразователь частоты типа автономного инвертора — асинхронный двигатель»	151
6.5. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания	157
6.5.1. Асинхронные вентильные каскады	157
6.5.2. Двигатели двойного питания	163
6.6. Вентильные двигатели	167
6.6.1. Бесщеточные двигатели постоянного тока	167
6.6.2. Электроприводы по системе «транзисторный коммутатор — вентильный двигатель с постоянными магнитами»	168
6.6.3. Электроприводы по системе «тиристорный коммутатор — синхронный двигатель»	172
Глава 7. Индукторные, шаговые и линейные электроприводы	176
7.1. Вентильно-индукторные электроприводы	176
7.2. Электроприводы с шаговыми двигателями	177
7.3. Электроприводы с линейными двигателями	180
Глава 8. Переходные процессы в электроприводе	185
8.1. Общие сведения	185
8.2. Переходные процессы, определяемые механической инерционностью электропривода	189
8.3. Переходные процессы в электроприводе постоянного тока	193
Глава 9. Типовые узлы и системы управления электроприводами	204
9.1. Виды электрической защиты	204
9.2. Релейно-контакторное управление электроприводами	206

9.3. Принципы построения систем регулирования электроприводов	215
9.4. Классификация замкнутых систем регулирования	218
9.5. Регуляторы	221
9.6. Система регулирования электропривода постоянного тока с суммирующим усилителем	225
9.7. Многоконтурные системы с подчиненным регулированием координат электропривода	229
9.8. Типовые системы управления асинхронными частотно-регулируемыми электроприводами	239
Глава 10. Энергетические характеристики электропривода	245
10.1. Энергетические показатели электропривода	245
10.2. Потери энергии в переходных режимах	249
10.3. Нагрев и охлаждение двигателя	251
10.4. Энергосбережение посредством электропривода	255
Глава 11. Основы проектирования автоматизированных электроприводов производственных механизмов	260
11.1. Общие требования, предъявляемые к электроприводу	260
11.2. Последовательность проектирования электропривода	261
11.3. Нагрузочные диаграммы и тахограммы	262
11.4. Расчет мощности и выбор типа электродвигателя	266
11.5. Основные системы регулируемого электропривода	274
11.6. Комплектные электроприводы	276
Список литературы	285