

В. В. МОСКАЛЕНКО, М. М. КАЦМАН

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ПРИВОДЫ

УЧЕБНИК

*Рекомендовано
Федеральным государственным бюджетным учреждением
«Федеральный институт развития образования» в качестве
учебника для использования в образовательном процессе
образовательных организаций, реализующих программы
среднего профессионального образования по специальности
«Оснащение средствами автоматизации технологических
процессов и производств (по отраслям)»*

*Регистрационный номер рецензии 141
от 28 июня 2018 г. ФГБУ «ФИРО»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2018

УДК 621.313+62-83(075.32)
ББК 31.291я723
М82

Рецензент —

преподаватель специальных дисциплин первой квалификационной категории
Государственного бюджетного профессионального образовательного учреждения
города Москвы «Московский государственный образовательный комплекс»
М. Ю. Исупов

Москаленко В. В.

М82 Электрические машины и приводы : учебник для студ.
учреждений сред. проф. образования / В. В. Москаленко,
М. М. Кацман. — М. : Издательский центр «Академия»,
2018. — 368 с.
ISBN 978-5-4468-8257-1

Учебник подготовлен в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по специальностям из списка ТОП-50 «Оснащение средствами автоматизации технологических процессов и производств (по отраслям)», «Мехатроника и мобильная робототехника (по отраслям)», а также по специальности «Технология машиностроения».

Учебное издание предназначено для изучения общепрофессиональной дисциплины «Электрические машины и приводы».

Рассмотрены принципы действия, устройство, основные свойства и характеристики трансформаторов и электрических машин переменного и постоянного тока общего и специального назначения, получивших распространение в различных технологических процессах промышленного производства. Раскрыто назначение электроприводов, их функции, структура, характеристики, регулировочные свойства, особенности пуска и торможения при использовании в схемах управления двигателями постоянного и переменного тока. Освещены вопросы энергетики электроприводов, расчета мощности электродвигателей и проверки их по нагреву при выборе для конкретных условий работы.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.313+62-83(075.32)
ББК 31.291я723

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

© Москаленко В. В., Светова Т. И. (наследница Кацмана М. М.),
2018

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2018

ISBN 978-5-4468-8257-1

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2018

Уважаемый читатель!

Вы держите в руках учебник, который был подготовлен Издательским центром «Академия» в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом (ФГОС) в рамках реализации комплексного проекта подготовки кадров по 50 наиболее востребованным на рынке труда новым и перспективным профессиям и специальностям среднего профессионального образования.

Одной из задач проекта является обновление содержания профессионального образования с учетом профессиональных стандартов, современных методик и технологий. При разработке ФГОС также учитывались требования международных конкурсов профессионального мастерства, включая чемпионаты «Молодые профессионалы» (WorldSkills и WorldSkills Russia).

Издательский центр «Академия» является лидером по выпуску учебных материалов для СПО в Российской Федерации. Более двадцати лет наши издания помогают студентам овладевать знаниями, умениями и навыками по рабочим профессиям и специальностям. Стремясь идти в ногу со временем, издательство предлагает не только печатные издания, но и электронные учебники, электронные учебно-методические комплексы и виртуальные практикумы.

Интерактивная форма подачи информации с учетом последних методик и тенденций в преподавании — отличительная особенность и визитная карточка Издательского центра «Академия» на российском рынке.

Мы надеемся, что данный учебник будет полезен студентам, облегчит задачу преподавателей, а также поможет специалистам, которые стремятся расти и развиваться в выбранной ими области, достичь новых профессиональных вершин.

Предисловие

Учебник написан в соответствии с учебной программой предмета «Электрические машины и приводы» для студентов учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по специальностям «Оснащение средствами автоматизации технологических процессов и производств (по отраслям)», «Мехатроника и мобильная робототехника (по отраслям)» (ТОП-50), «Электрические машины и аппараты», «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям)», и соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования.

В части I учебник рассмотрены элементы теории, описание принципов действия, устройства и характеристик электрических машин и трансформаторов как общего, так и специального назначения.

Часть II посвящена рассмотрению назначения и функциям электроприводов постоянного и переменного тока, их схемам, характеристикам и способам управления движением исполнительных органов рабочих машин и механизмов.

Изложение материала сопровождается примерами решения типовых задач и задачами для самостоятельного решения, а также контрольными вопросами для самопроверки. Изучение предмета «Электрические машины и приводы» базируется на знаниях студентов по физике, математике, электротехнике и электронике.

Научно-технический прогресс, автоматизация и комплексная механизация технологических и производственных процессов определяют широкое использование и постоянное совершенствование электротехнических, электромеханических и электронных элементов и устройств, к числу которых относятся электрические машины и электроприводы. Электрические машины применяются в качестве генераторов при выработке электрической энергии постоянного и переменного тока; электрические двигатели используются в составе электропривода для выработки механической

энергии, необходимой для выполнения тех или иных технологических операций, а трансформаторы находят самое широкое применение при производстве, передаче и преобразовании электрической энергии.

Для обеспечения требуемого уровня использования этих устройств, их монтажа, наладки, эксплуатации и технического обслуживания необходимы специалисты высокой квалификации, постоянно пополняющие и совершенствующие свои профессиональные знания, умения и навыки. Помочь им в этом и предназначен учебник.

В.1. Назначение электрических машин, трансформаторов и электропривода

Электрификация — это широкое внедрение в промышленность, сельское хозяйство, транспорт и быт электрической энергии, вырабатываемой на электростанциях, объединенных высоковольтными электрическими сетями в энергетические системы.

Электрическая машина представляет собой электромеханическое устройство, осуществляющее взаимное преобразование механической и электрической энергий. Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях электрическими машинами — генераторами, преобразующими механическую энергию в электрическую.

Основная часть электроэнергии (до 80%) вырабатывается на тепловых электростанциях, где при сжигании топлива (уголь, торф, газ) вода нагревается и переводится в пар высокого давления и температуры. Последний подается в паровую турбину, где, расширяясь, приводит ротор турбины во вращение (тепловая энергия в турбине преобразуется в механическую). Вращение ротора турбины передается на вал генератора (турбогенератора). В результате электромагнитных процессов, происходящих в генераторе, механическая энергия преобразуется в электрическую.

Процесс производства электроэнергии на атомных электростанциях аналогичен процессу на тепловой электростанции, с той лишь разницей, что вместо органического топлива там используется ядерное.

На гидравлических электростанциях процесс выработки электроэнергии состоит в следующем: вода, поднятая плотиной на определенный уровень, сбрасывается на рабочее колесо гидротурбины; получаемая при этом механическая энергия путем вращения колеса турбины передается на вал электрического генератора

(гидрогенератора), в котором механическая энергия преобразуется в электрическую.

Электрическую энергию, вырабатываемую на электростанциях, необходимо передать в места ее потребления, прежде всего в крупные промышленные центры страны, которые удалены от мощных электростанций на многие сотни, а иногда и тысячи километров. Но электроэнергию недостаточно только передать. Ее необходимо распределить среди множества разнообразных потребителей — промышленных предприятий, жилых зданий и т. д. Передачу электроэнергии на большие расстояния осуществляют при высоком напряжении (до 500 кВ и более), чем обеспечиваются минимальные электрические потери в линиях электропередачи. Поэтому в процессе передачи и распределения электрической энергии приходится неоднократно повышать и понижать электрическое напряжение. Этот процесс выполняется посредством электромагнитных устройств, называемых *трансформаторами*. Трансформатор не является электрической машиной, так как его работа не связана с преобразованием электрической энергии в механическую, или наоборот. Трансформаторы преобразуют лишь напряжение электрической энергии. Кроме того, трансформатор — это статическое устройство, и в нем нет никаких движущихся частей. Однако электромагнитные процессы, протекающие в трансформаторах, аналогичны процессам, происходящим при работе электрических машин. Более того, электрическим машинам и трансформаторам свойственна единая природа электромагнитных и энергетических процессов, возникающих при взаимодействии магнитного поля и проводника с током.

В процессе потребления электрической энергии происходит ее преобразование в другие виды энергий (тепловую, механическую, световую и химическую). Около 70 % электроэнергии используется для приведения в движение станков, механизмов, транспортных средств, т. е. для преобразования ее в механическую энергию. Это преобразование осуществляется электродвигателем, являющимся основным элементом электрического привода (ЭП).

Теоретические основы работы электрических машин были заложены в 1821 г. М. Фарадеем, установившим возможность преобразования электрической энергии в механическую и создавшим первую модель электродвигателя. Важную роль в развитии электрических машин имели работы ученых Д. Максвелла и Э. Х. Ленца. Идея взаимного преобразования электрической и механической энергий получила дальнейшее развитие в работах выдающихся русских ученых Б. С. Якоби и М. О. Доливо-Добровольского, кото-

рыми были разработаны и созданы конструкции электродвигателей, пригодные для практического использования.

Большие заслуги в создании трансформаторов и их практическом применении принадлежат замечательному русскому изобретателю П.Н.Яблочкову. В начале XX в. были созданы почти все основные виды электрических машин и трансформаторов и разработаны основы их теории.

Историю ЭП обычно начинают отсчитывать с разработки русским академиком Б.С.Якоби первого двигателя постоянного тока вращательного движения. Установка этого двигателя на небольшой катер, который в 1838 г. совершил испытательные рейсы по Неве, является первым примером реализации ЭП.

Мощным толчком к развитию ЭП явилась разработка в 1889 г. М.О.Доливо-Добровольским системы трехфазного тока и появление трехфазного асинхронного электродвигателя, что создало реальные технические и экономические предпосылки для широкого использования электрической энергии, а значит, и ЭП.

Первой научной работой по теории электропривода явилась опубликованная в 1880 г. в журнале «Электричество» статья русского инженера Д.А.Лачинова «Электромеханическая работа», в которой на научной основе были показаны преимущества электрического распределения механической энергии.

Электрификация нашей страны и широкое применение в народном хозяйстве электроприводов начались после принятия и реализации государственного плана электрификации России — плана ГОЭЛРО, который предусматривал широкое строительство новых и реконструкцию старых электростанций, строительство новых линий электропередач, развитие электротехнической промышленности.

Одновременно происходило дальнейшее развитие и теории электропривода. Впервые как самостоятельная дисциплина теория электропривода представлена в книге С.А.Ринкевича «Электрическое распределение механической энергии», вышедшей в 1925 г.

В настоящее время, когда важнейшим направлением научно-технического прогресса стала автоматизация технологических процессов, которая позволяет повысить производительность общественного труда в народном хозяйстве, сделать его более творческим и привлекательным, что уже само по себе является решением важной социальной задачи. Характерной чертой автоматизации является быстрое развитие робототехники, внедрение гибких автоматизированных производств, автоматических линий, машин и оборудования со встроенными средствами микропроцес-

сорной техники, многооперационных станков с числовым программным управлением, роторных конвейерных комплексов.

Дальнейшее развитие электрификации и автоматизации технологических процессов, создание высокопроизводительных машин, механизмов и технологических комплексов во многом определяется развитием электрических машин и электрического привода.

В.2. Электрические машины — электромеханические преобразователи энергии

Изучение электрических машин основано на знаниях физической сущности электрических и магнитных явлений, излагаемых в курсе «Теоретические основы электротехники».

В процессе работы электрической машины в режиме генератора происходит преобразование механической энергии в электрическую.

В основе этого процесса лежит **закон электромагнитной индукции**: если внешней силой F воздействовать на помещенный в магнитное поле проводник и перемещать его (рис. В.1, а), например, слева направо перпендикулярно вектору индукции B магнитного поля со скоростью v , то в проводнике будет наводиться электродвижущая сила (ЭДС) E :

$$E = Blv, \quad (\text{В.1})$$

где B — магнитная индукция, Тл; l — активная длина проводника, т. е. длина его части, находящейся в магнитном поле, м; v — скорость движения проводника, м/с.

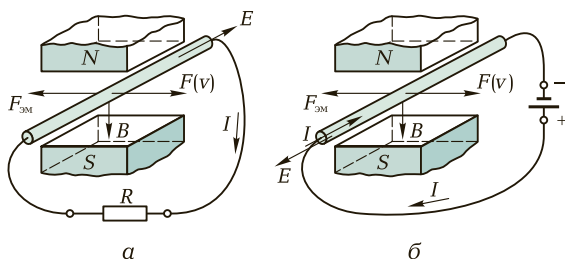


Рис. В.1. К понятиям «элементарный генератор» (а) и «элементарный двигатель» (б)

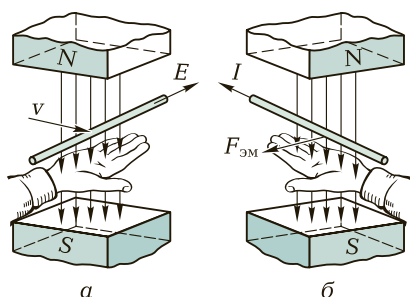


Рис. В.2. Правила «правой руки» (а) и «левой руки» (б)

Для определения направления ЭДС следует воспользоваться правилом «правой руки» (рис. В.2, а). Применяв это правило, определим направление ЭДС в проводнике («от нас»). Если концы проводника замкнуты на внешнее сопротивление R (потребитель) (см. рис. В.1, а), то под действием ЭДС E в проводнике возникнет ток I такого же направления. Таким образом, проводник в магнитном поле можно рассматривать в этом случае как **элементарный генератор**, в котором механическая энергия затрачивается на перемещение проводника со скоростью v .

В результате взаимодействия тока I с магнитным полем возникает действующая на проводник электромагнитная сила

$$F_{\text{эм}} = BIl. \quad (\text{В.2})$$

Направление силы $F_{\text{эм}}$ можно определить по правилу «левой руки» (рис. В.2, б). В рассматриваемом случае эта сила направлена справа налево, т. е. противоположно движению проводника. Таким образом, в рассматриваемом элементарном генераторе сила $F_{\text{эм}}$ является тормозящей по отношению к движущей силе F . При равномерном движении проводника эти силы равны, т. е. $F = F_{\text{эм}}$. Умножив обе части равенства на скорость движения проводника v , получим

$$Fv = F_{\text{эм}}v.$$

Подставив в это выражение значение $F_{\text{эм}}$ из (В.2), получим

$$Fv = BIlv = EI. \quad (\text{В.3})$$

Левая часть равенства (В.3) определяет значение механической мощности, затрачиваемой на перемещение проводника в магнитном поле; правая часть — значение электрической мощности, развиваемой в замкнутом контуре электрическим током I . Знак равенства между этими частями еще раз подтверждает, что в генера-

торе механическая мощность Fv , затрачиваемая внешней силой, преобразуется в электрическую мощность EI .

Если внешнюю силу F проводнику не прикладывать, а от источника электроэнергии подвести к нему напряжение U так, чтобы ток I в проводнике имел направление, указанное на рис. В.1, б, то на проводник будет действовать только электромагнитная сила $F_{эм}$. Под действием этой силы проводник начнет двигаться в магнитном поле. При этом в проводнике будет индуцироваться ЭДС с направлением, противоположным напряжению U . Таким образом, часть напряжения U , приложенного к проводнику, уравновешивается ЭДС E , наведенной в этом проводнике, а другая часть составляет падение напряжения в проводнике:

$$U = E + Ir, \quad (B.4)$$

где r — электрическое сопротивление проводника.

Умножив обе части равенства на ток I , получим

$$UI = EI + I^2r.$$

Подставляя вместо E значение ЭДС из (B.1), получим

$$UI = BlvI + I^2r,$$

или, учитывая (B.2), получим

$$UI = F_{эм}v + I^2r. \quad (B.5)$$

Из этого равенства следует, что электрическая мощность (UI), поступающая в проводник из сети, частично преобразуется в механическую ($F_{эм}v$), а частично расходуется на покрытие электрических потерь в проводнике (I^2r). Следовательно, проводник с током, помещенный в магнитном поле, можно рассматривать как **элементарный электродвигатель**.

Описанные явления позволяют сделать вывод:

а) для любой электрической машины обязательно наличие электропроводящей среды (проводников) и магнитного поля, имеющих возможность взаимного перемещения;

б) при работе электрической машины как в режиме генератора, так и в режиме двигателя одновременно наблюдаются индуцирование ЭДС в проводнике, пересекающем магнитное поле, и возникновение механической силы, действующей на проводник, находящийся в магнитном поле, при прохождении по нему электрического тока;

в) взаимное преобразование механической и электрической энергий в электрической машине может происходить в любом на-

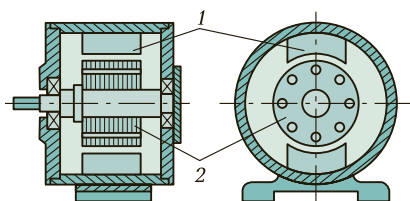


Рис. В.3. Обобщенная конструктивная схема электрической машины:
1 — статор; 2 — ротор

правления, т. е. одна и та же электрическая машина может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора; это свойство электрических машин называют **обратимостью**.

Рассмотренные «элементарные» электрические генератор и двигатель отражают лишь принцип использования в них основных законов и явлений электрического тока. Что же касается конструктивного исполнения, то большинство электрических машин построено на принципе вращательного движения их подвижной части. Несмотря на большое разнообразие конструкций электрических машин, оказывается возможным представить себе некоторую обобщенную конструкцию электрической машины. Такая конструкция (рис. В.3) состоит из неподвижной части 1, называемой *статором*, и вращающейся части 2, называемой *ротором*. Ротор располагается в расточке статора и отделен от него воздушным зазором. Одна из указанных частей машины снабжена элементами, возбуждающими в машине магнитное поле (например, электромагнит или постоянный магнит), а другая — имеет обмотку, которую будем условно называть *рабочей обмоткой машины*. Как неподвижная часть машины (статор), так и подвижная (ротор) имеют сердечники, выполненные из магнитно-мягкого материала и обладающие небольшим магнитным сопротивлением.

Если электрическая машина работает в режиме генератора, то при вращении ротора (под действием приводного двигателя) в проводниках рабочей обмотки наводится ЭДС и при подключении потребителя появляется электрический ток. При этом механическая энергия приводного двигателя преобразуется в электрическую. Если машина предназначена для работы в качестве электродвигателя, то рабочая обмотка машины подключается к сети. При этом ток, возникший в проводниках этой обмотки, взаимодействует с магнитным полем и на роторе возникают электромагнитные силы, приводящие ротор во вращение. При этом электрическая энергия, потребляемая двигателем из сети, преобразуется

в механическую энергию, затрачиваемую на приведение в действие какого-либо механизма, станка, транспортного средства и т. д.

Возможны также конструкции электрических машин, у которых рабочая обмотка расположена на статоре, а элементы, возбуждающие магнитное поле, — на роторе. Принцип работы машины при этом остается прежним.

Диапазон мощностей электрических машин весьма широк — от долей ватта до сотен тысяч киловатт.

В.3. Классификация электрических машин

Использование электрических машин в качестве генераторов и двигателей является их главным назначением, так как связано исключительно с целью взаимного преобразования электрической и механической энергий. Однако применение электрических машин в различных отраслях техники может иметь и другие цели. Так, потребление электроэнергии часто связано с преобразованием переменного тока в постоянный или же с преобразованием тока промышленной частоты в ток более высокой частоты. Для этих целей применяют *электромашинные преобразователи*.

Электрические машины используют также для усиления мощности электрических сигналов. Такие электрические машины называют *электромашинными усилителями*. Электрические машины, используемые для повышения коэффициента мощности потребителей электроэнергии, называют *синхронными компенсаторами*. Электрические машины, служащие для регулирования напряжения переменного тока, называют *индукционными регуляторами*.

Очень разнообразно применение *микромашин* в устройствах автоматики. Здесь электрические машины используют не только в качестве двигателей, но и в качестве *тахогенераторов* (для преобразования частоты вращения в электрический сигнал), *сельсинов*, *вращающихся трансформаторов* (для получения электрических сигналов, пропорциональных углу поворота вала) и т. д. Из приведенных примеров видно, сколь разнообразны электрические машины по назначению.

Рассмотрим классификацию электрических машин по принципу действия, согласно которой все электрические машины подразделяют на бесколлекторные и коллекторные, различающиеся как принципом действия, так и конструкцией. Бесколлекторные машины — это машины переменного тока. Их подразделяют на

асинхронные и синхронные. Асинхронные машины применяют преимущественно в качестве двигателей, а синхронные — как в качестве двигателей, так и в качестве генераторов. Коллекторные машины используют главным образом для работы на постоянном токе в качестве генераторов или двигателей. Лишь коллекторные машины небольшой мощности делают с универсальными двигателями, способными работать как от сети постоянного, так и от сети переменного тока.

Электрические машины одного принципа действия могут различаться схемами включения либо другими признаками, влияющими на эксплуатационные свойства этих машин. Например, асинхронные и синхронные машины могут быть трехфазными (включаемыми в трехфазную сеть) или однофазными. Асинхронные машины в зависимости от конструкции обмотки ротора разделяют на машины с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором. Синхронные и коллекторные машины постоянного тока в зависимости от способа создания в них магнитного поля возбуждения разделяют на машины с обмоткой возбуждения и машины



Рис. В.4. Классификация электрических машин

с постоянными магнитами. На рис. В.4 показана классификация электрических машин, содержащая основные их виды, получившие наибольшее применение в современном электроприводе. Эта же классификация положена в основу изучения курса «Электрические машины и приводы».

Данный курс помимо собственно электрических машин предусматривает изучение трансформаторов. Трансформаторы являются статическими преобразователями электроэнергии переменного тока. Отсутствие каких-либо вращающихся частей придает трансформаторам конструкцию, принципиально отличающую их от электрических машин. Однако принцип действия трансформаторов, так же как и электрических машин, основан на явлении электромагнитной индукции, и поэтому многие положения теории трансформаторов составляют основу теории электрических машин переменного тока.

I

РАЗДЕЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ

- Глава 1. Трансформаторы
- Глава 2. Асинхронные электрические машины
- Глава 3. Синхронные электрические машины
- Глава 4. Электрические машины постоянного тока

ТРАНСФОРМАТОРЫ

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформаторы широко применяют в системах передачи и распределения электроэнергии. Известно, что передача электроэнергии на дальние расстояния осуществляется при высоком напряжении (до 500 кВ и более), благодаря чему значительно уменьшаются электрические потери в линии электропередачи. Получить такое высокое напряжение в генераторе трудно, поэтому электроэнергия после генератора подается на повышающий трансформатор, в котором напряжение увеличивается до требуемого значения. Это напряжение должно быть тем выше, чем больше протяженность линии электропередачи и чем больше передаваемая по этой линии мощность. Например, при передаче электроэнергии мощностью 10^6 кВт на расстояние 1 000 км необходимо напряжение 500 кВ. В местах распределения электроэнергии между потребителями устанавливают понижающие трансформаторы, которые понижают напряжение до требуемого значения. И, наконец, в местах потребления электроэнергии напряжение еще раз понижают посредством трансформаторов до 220, 380 или 660 В. При таком напряжении электроэнергия подается непосредственно потребителям — на рабочие места предприятий и в жилые помещения.

Таким образом, электроэнергия переменного тока в процессе передачи от электростанции к потребителям подвергается трех-, а иногда и четырехкратному трансформированию. Помимо этого основного применения трансформаторы используются в различных электроустановках — в электроприводе, нагревательных печах и т. д.

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две (или более) индуктивно связанные об-

мотки и предназначенное для преобразования посредством явления электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

В общем случае вторичная система переменного тока может отличаться от первичной любыми параметрами: значениями напряжения и тока, числом фаз, формой графика напряжения (тока), частотой. Наибольшее применение в электротехнических установках, а также в энергетических системах передачи и распределения электроэнергии имеют *силовые трансформаторы*, посредством которых изменяют значения переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма графика напряжения (тока) и частота остаются неизменными.

Трансформаторы разделяют на силовые трансформаторы общего назначения и трансформаторы специального назначения. Силовые трансформаторы общего назначения применяют в линиях передачи и распределения электроэнергии, а также в различных электроустройствах для получения требуемого напряжения. Трансформаторы специального назначения характеризуются разнообразием рабочих свойств и конструктивного исполнения. К этим трансформаторам относятся печные и сварочные трансформаторы для устройств автоматики (пик-трансформаторы, импульсные, умножители частоты и т. д.), испытательные, измерительные и т. д.

Далее при изложении материала будем иметь в виду силовые трансформаторы общего назначения.

1.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРОВ

Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала (обычно листовая электротехническая сталь), и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (рис. 1.1, а). Одна из обмоток, которую называют *первичной*, присоединена к источнику переменного тока \mathcal{G} (генератору) на напряжение U_1 . К другой обмотке, называемой *вторичной*, подключен потребитель $Z_{\text{нп}}$. Первичная и вторичная обмотки трансформатора не имеют электрической связи друг с другом, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем. Магнитопровод, на котором расположены эти обмотки, служит для усиления индуктивной связи между обмотками.

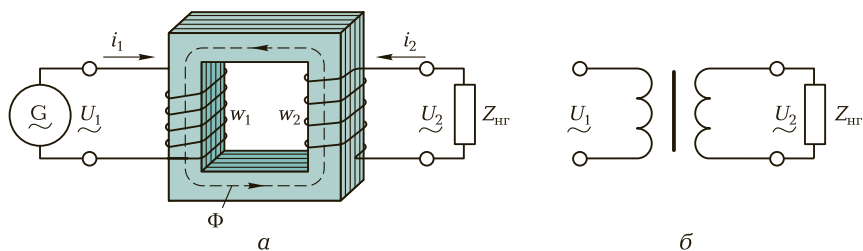


Рис. 1.1. Электромагнитная (а) и принципиальная (б) схемы трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток i_1 , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуцирует в них ЭДС:

в первичной обмотке — ЭДС *самоиндукции*

$$e_1 = -w_1(d\Phi/dt), \quad (1.1)$$

во вторичной обмотке — ЭДС *взаимоиндукции*

$$e_2 = -w_2(d\Phi/dt), \quad (1.2)$$

где w_1 и w_2 — число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора соответственно.

При подключении нагрузки $Z_{нр}$ к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС e_2 в цепи этой обмотки создается ток i_2 , а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2 . В повышающих трансформаторах $U_2 > U_1$, а в понижающих $U_2 < U_1$.

Из (1.1) и (1.2) видно, что ЭДС e_1 и e_2 , наводимые в обмотках трансформатора, отличаются друг от друга лишь за счет разного числа витков w_1 и w_2 в обмотках, поэтому, применяя обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор практически на любое отношение напряжений.

Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, — *обмоткой низшего напряжения* (НН).

Преобразование напряжения определяется коэффициентом трансформации K :

$$K = \frac{W_1}{W_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{2xx}}. \quad (1.3)$$

На рис. 1.1, б показано условное изображение однофазного трансформатора на принципиальных электрических схемах.

Трансформаторы обладают свойством *обратимости*: один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо он повышающий, либо — понижающий.

Трансформатор — это аппарат переменного тока. Если же его первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора также будет постоянным как по величине, так и по направлению $[(d\Phi/dt) = 0]$, поэтому в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС, а следовательно, электроэнергия из первичной цепи не будет передаваться во вторичную.

Классифицируют трансформаторы по нескольким признакам:

- по назначению — силовые общего и специального назначения, импульсные, для преобразования частоты и т. д.;
- в виду охлаждения — с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением (см. рис. 1.3);
- числу трансформируемых фаз — однофазные и трехфазные;
- форме магнитопровода — стержневые, броневые, бронестержневые, тороидальные;
- числу обмоток — двухобмоточные, многообмоточные.

Трансформатор состоит из различных конструктивных элементов: магнитопровода, обмоток, вводов, бака и др. Магнитопровод с расположенными на его стержнях обмотками составляет *активную часть* трансформатора. Остальные элементы трансформатора называют *неактивными* (вспомогательными) частями.

Рассмотрим подробнее конструкцию основных частей трансформатора.

Магнитопровод в трансформаторе выполняет две функции: во-первых, он составляет магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора, а во-вторых, он предназначен для установки и крепления обмоток, отводов, переключателей. Магнитопровод имеет шихтованную конструкцию, т. е. он состоит из тонких (обычно толщиной 0,5 мм) пластин элек-

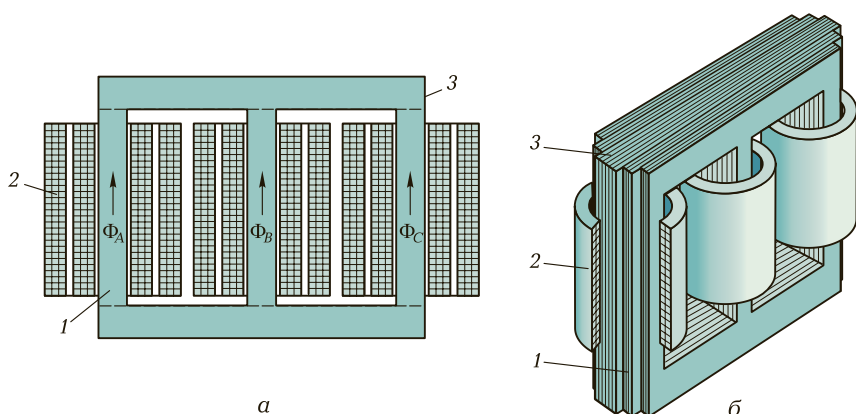


Рис. 1.2. Магнитопровод трехфазного трансформатора стержневого типа с обмотками (а) и его внешний вид (б):

1 — стержни; 2 — обмотки; 3 — ярма

тротехнической стали, покрытых с двух сторон изолирующей пленкой (например, лаком). Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.

Силовые трансформаторы выполняют с магнитопроводами трех типов: стержневого, броневого и бронестержневого.

В магнитопроводе стержневого типа (рис. 1.2, а) вертикальные стержни 1, на которых расположены обмотки 2, сверху и снизу замкнуты ярмами 3. На каждом стержне расположены обмотки соответствующей фазы и проходит магнитный поток этой фазы: в крайних стержнях — потоки Φ_A и Φ_C , а в среднем стержне — поток Φ_B . На рис. 1.2, б показан внешний вид магнитопровода. При этом стержни имеют ступенчатое сечение, вписываемое в круг диаметром d (рис. 1.3). Стержни трансформаторов большой мощности имеют много ступеней, что обеспечивает лучшее заполнение сталью площади внутри обмотки. Для лучшей теплоотдачи иногда между отдельными пакетами стержня оставляют воздушные зазоры шириной 5—6 мм, служащие *вентиляционными каналами*.

Магнитопровод броневого типа представляет собой разветвленную конструкцию со стержнем и ярмами, частично прикрывающими («бронированными») обмотки (рис. 1.4). Магнитный поток в стержне магнитопровода броневого типа в два раза больше, чем в ярмах, каждое из которых имеет сечение, вдвое мень-

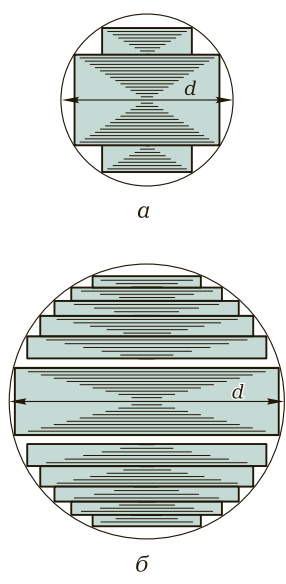


Рис. 1.3. Форма сечения стержней трансформаторов:

a — малой и средней мощности; *б* — большой мощности

шее сечения стержня. Из-за технологической сложности изготовления магнитопроводы броневого типа не получили широкого распространения, их применяют лишь в силовых трансформаторах весьма малой мощности (радиотрансформаторы).

В трансформаторах большой мощности применяют бронестержневую конструкцию магнитопровода (рис. 1.5), которая хотя и требует несколько повышенного расхода электротехнической стали, но позволяет уменьшить высоту магнитопровода ($H_{БС} \ll H_C$), а следовательно,

и высоту трансформатора. Это имеет важное значение при транспортировке трансформаторов.

Во избежание возникновения разности потенциалов между металлическими частями во время работы трансформатора, что может вызвать пробой изоляционных промежутков, разделяющих эти части, магнитопровод и детали его крепления **обязательно заземляют**. Заземление осуществляют медными лентами, вставляемыми между стальными пластинами магнитопровода одними концами и прикрепляемыми к ярмовым балкам другими концами.

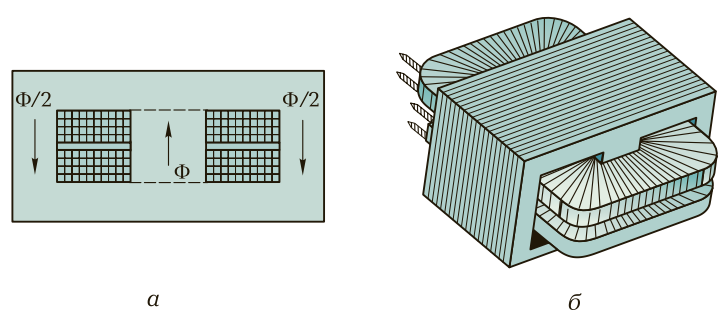


Рис. 1.4. Однофазный трансформатор броневого типа:

a — устройство; *б* — внешний вид

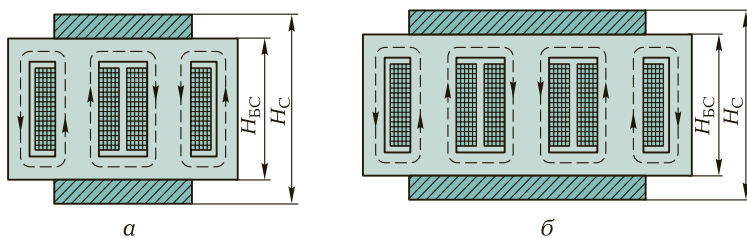


Рис. 1.5. Магнитопроводы бронестержневых трансформаторов:
 а — однофазного; б — трехфазного

Магнитопроводы трансформаторов малой мощности (обычно мощностью не более 1 кВ·А) чаще всего изготавливают из узкой ленты электротехнической холоднокатаной стали путем навивки. Такие магнитопроводы делают разрезными, а после насадки обмоток собирают встык и стягивают специальными хомутами.

Обмотки трансформаторов средней и большой мощности выполняют из обмоточных проводов круглого или прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой. Основой обмотки в большинстве случаев является бумажно-бакелитовый цилиндр, на котором крепятся элементы (рейки, угловые шайбы и т. д.), обеспечивающие обмотке механическую и электрическую прочность.

По взаимному расположению на стержне обмотки разделяют на концентрические и чередующиеся.

Концентрические обмотки выполняют в виде цилиндров, размещаемых на стержне концентрически: ближе к стержню обычно располагают обмотку НН (требующую меньшей изоляции от стержня), а снаружи — обмотку ВН.

Чередующиеся (дисковые) обмотки выполняют в виде отдельных секций (дисков) НН и ВН и располагают на стержне в чередующемся порядке. Их применяют крайне редко, лишь в некоторых трансформаторах специального назначения.

В *трансформаторах с масляным охлаждением* магнитопровод с обмотками помещен в бак, наполненный трансформаторным маслом (рис. 1.6). Трансформаторное масло, омывая обмотки 2 и 3 и магнитопровод 1, отбирает от них теплоту и, обладая более высокой теплопроводностью, чем воздух, через стенки бака 4 и трубы радиатора 5 отдает ее в окружающую среду. Наличие трансформаторного масла обеспечивает более надежную работу высоковольтных трансформаторов, так как электрическая прочность

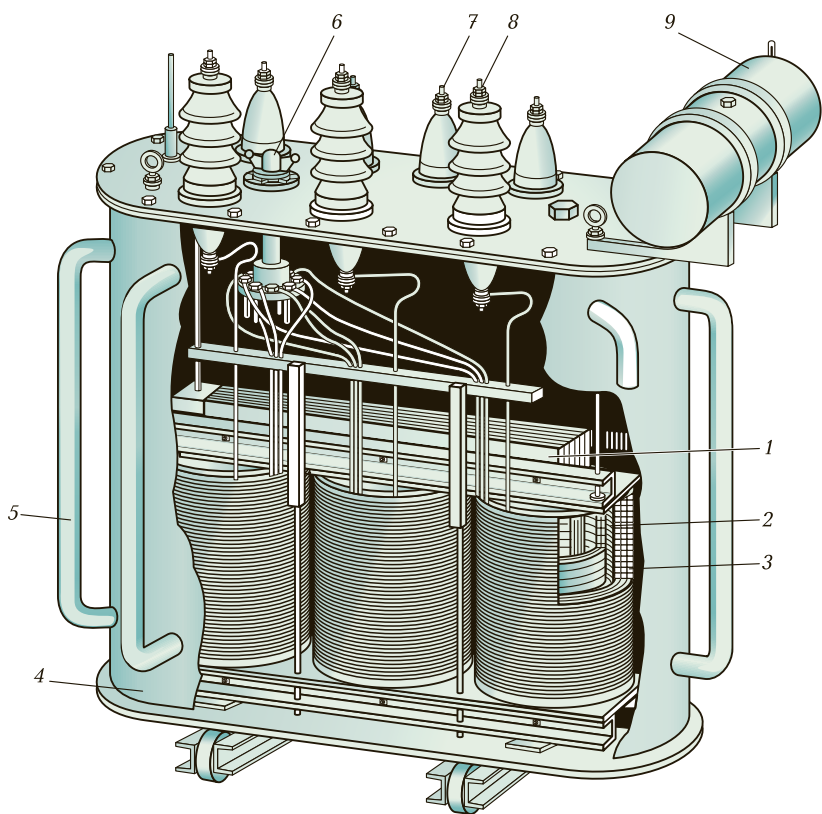


Рис. 1.6. Устройство трансформатора с масляным охлаждением:
 1 — магнитопровод; 2 и 3 — обмотки; 4 — бак; 5 — трубы радиатора; 6 — рукоятка;
 7 и 8 — вводы; 9 — расширитель

масла намного выше, чем воздуха. Масляное охлаждение интенсивнее воздушного, поэтому габаритные размеры и масса масляных трансформаторов меньше, чем у сухих трансформаторов такой же мощности.

В трансформаторах мощностью до 30 кВ·А применяют баки с гладкими стенками. У более мощных трансформаторов для увеличения охлаждаемой поверхности стенки бака делают ребристыми или применяют трубчатые баки. Масло, нагреваясь, поднимается вверх, а охлаждаясь, опускается вниз. При этом масло циркулирует в трубах, что способствует более быстрому его охлаждению.

Для компенсации объема масла при изменении температуры, а также для защиты масла от окисления и увлажнения при кон-

такте с воздухом в трансформаторах применяют расширитель 9, представляющий собой цилиндрический сосуд, установленный на крышке бака и сообщающийся с ним. Колебания уровня масла с изменением его температуры происходят не в баке, который всегда заполнен маслом, а в расширителе, сообщающемся с атмосферой.

В процессе работы трансформаторов не исключена возможность возникновения в них явлений, сопровождающихся бурным выделением газов, что ведет к значительному увеличению давления внутри бака, поэтому во избежание повреждения баков трансформаторы мощностью 1000 кВ · А и более снабжают выхлопной трубой, которую устанавливают на крышке бака. Нижним концом труба сообщается с баком, а ее верхний конец заканчивается фланцем, на котором укреплен стеклянный диск. При давлении, превышающем безопасное для бака, стеклянный диск лопается и газы выходят наружу.

В трубопровод, соединяющий бак масляного трансформатора с расширителем, помещено газовое реле. При возникновении в трансформаторе значительных повреждений, сопровождаемых обильным выделением газов (например, при коротком замыкании между витками обмоток), газовое реле срабатывает и замыкает контакты цепи управления выключателя, который отключает трансформатор от сети. Обмотки трансформатора с внешней цепью соединяют вводами 7 и 8. В масляных трансформаторах для вводов обычно используют проходные фарфоровые изоляторы. Такой ввод снабжен металлическим фланцем, посредством которого он крепится к крышке или стенке бака. К дну бака прикреплена тележка, позволяющая перемещать трансформатор в пределах подстанции. На крышке бака расположена рукоятка переключателя напряжений 6.

Технические данные трансформатора определяются его *номинальными параметрами*:

- 1) номинальное первичное линейное напряжение $U_{1ном}$, В;
- 2) номинальное вторичное линейное напряжение $U_{2ном}$ (напряжение на выводах вторичной обмотки при отключенной нагрузке и номинальном первичном напряжении), В;
- 3) номинальные линейные токи в первичной $I_{1ном}$ и вторичной $I_{2ном}$ обмотках, А;
- 4) номинальная полная мощность $S_{ном}$, кВ · А (для однофазного трансформатора $S_{ном} = U_{1ном} I_{1ном}$, для трехфазного — $S_{ном} = \sqrt{3} U_{1ном} I_{1ном}$). В связи с тем что потери мощности в трансформаторах невелики, то принято считать номинальную полную мощ-

ность в цепи первичной обмотки приблизительно равной номинальной полной мощности в цепи вторичной обмотки:

$$S_{\text{НОМ}} = U_{1\text{НОМ}} I_{1\text{НОМ}} \approx U_{2\text{НОМ}} I_{2\text{НОМ}}.$$

Номинальные линейные токи вычисляются по номинальной мощности трансформатора: для трехфазного трансформатора

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{1\text{НОМ}}}; I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{2\text{НОМ}}}, \quad (1.4)$$

где $S_{\text{НОМ}}$ — номинальная мощность трехфазного трансформатора, кВ · А.

Каждый трансформатор рассчитан для включения в сеть переменного тока определенной частоты. В России трансформаторы общего назначения рассчитаны на частоту $f = 50$ Гц (в некоторых других странах $f = 60$ Гц), в устройствах автоматики и связи применяют трансформаторы на частоты 50, 400 или 1 000 Гц.

Пример 1.1. Номинальные значения первичного и вторичного напряжений однофазного трансформатора $U_{1\text{НОМ}} = 110$ кВ, $U_{2\text{НОМ}} = 6,3$ кВ, номинальный первичный ток $I_{1\text{НОМ}} = 95,5$ А. Определить номинальную мощность трансформатора $S_{\text{НОМ}}$ и номинальный вторичный ток $I_{2\text{НОМ}}$.

Решение. 1. Номинальная мощность трансформатора: $S_{\text{НОМ}} = U_{1\text{НОМ}} I_{1\text{НОМ}} = 110 \cdot 95,5 = 10\,500$ кВ · А.

2. Номинальный вторичный ток: $I_{2\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} / U_{2\text{НОМ}} = 10\,500 / 6,3 = 1\,666,7$ А.

1.3. ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ И СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформирование трехфазной системы напряжений можно выполнить тремя однофазными трансформаторами, соединенными в трансформаторную группу (рис. 1.7, а). Однако повышенные габариты и стоимость ограничивает применение трансформаторной группы установками значительной мощности (более 60 000 кВ · А). В этом случае используется уменьшение массы и габаритов единицы оборудования (одного однофазного трансформатора, мощность которого составляет $1/3$ мощности трансформаторной группы), что имеет большое значение при монтаже и транспортировке трансформаторной группы.

В установках мощностью примерно до 60 000 кВ · А обычно применяют трехфазные трансформаторы (рис. 1.7, б), у ко-

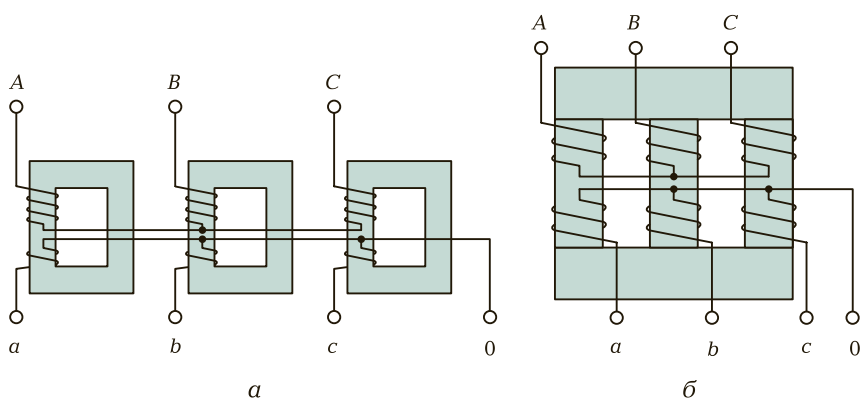


Рис. 1.7. Трансформаторная группа (а) и трехфазный трансформатор (б)

торых обмотки расположены на трех стержнях, объединенных в общий магнитопровод двумя ярами (см. рис. 1.2).

Обмотки трехфазных трансформаторов принято соединять по следующим схемам: звезда; звезда с нулевым выводом; треугольник; зигзаг с нулевым выводом. Схемы соединения обмоток трансформатора обозначают дробью, в числителе которой указана схема соединения обмоток ВН, а в знаменателе — обмоток НН. Например, Y/Δ означает, что обмотки ВН соединены в звезду, а обмотки НН — в треугольник.

Схема соединения обмоток в *звезду* показана на рис. 1.8, а и б, а в *треугольник* — на рис. 1.8, в.

Соединение в *зигзаг* применяют только в трансформаторах специального назначения, например в трансформаторах для выпрямителей.

Выводы обмоток трансформаторов принято обозначать следующим образом: обмотки ВН — начало обмоток А, В, С, соответ-

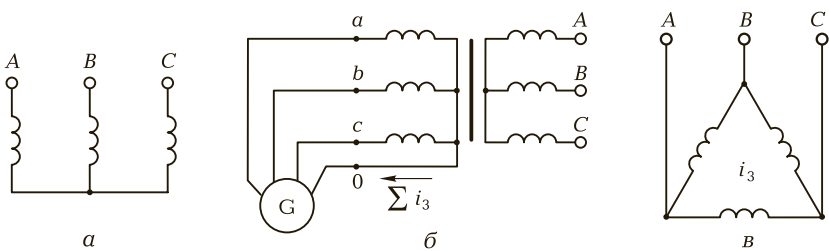


Рис. 1.8. Схема соединения обмоток в звезду (а и б) и треугольник (в)

ствующие концы X, Y, Z ; обмотки НН — начало обмоток a, b, c , соответствующие концы x, y, z .

При соединении обмоток звездой линейное напряжение больше фазного ($U_\lambda = \sqrt{3}U_\phi$), а при соединении обмоток треугольником линейное напряжение равно фазному ($U_\lambda = U_\phi$).

Отношение линейных напряжений трехфазного трансформатора для разных схем соединения обмоток определяется следующим образом:

Схема соединения обмоток	Y/Y	Δ/Y	Δ/Δ	Y/ Δ
Отношение линейных напряжений.....	w_1/w_2	$w_1/(\sqrt{3}w_2)$	w_1/w_2	$\sqrt{3}w_1/w_2$

Таким образом, отношение линейных напряжений в трехфазном трансформаторе определяется не только отношением числа витков фазных обмоток, но и схемой их соединений.

Пример 1.2. Трехфазный трансформатор номинальной мощностью $S_{\text{ном}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ включен по схеме Y/ Δ . При этом номинальные линейные напряжения на входе и выходе трансформатора соответственно равны: $U_{1\text{ном}} = 3,0 \text{ кВ}$, $U_{2\text{ном}} = 0,4 \text{ кВ}$. Определить соотношение витков w_1/w_2 и номинальные значения фазных токов в первичной $I_{1\phi}$ и вторичной $I_{2\phi}$ обмотках.

Решение. Фазные напряжения первичных и вторичных обмоток

$$U_{1\phi} = U_{1\text{ном}}/\sqrt{3} = 3,0/\sqrt{3} = 1,73 \text{ кВ}, U_{2\phi} = U_{2\text{ном}} = 0,4 \text{ кВ}.$$

Требуемое соотношение витков в трансформаторе

$$w_1/w_2 = U_{1\phi}/U_{2\phi} = 1,73/0,4 = 4,32.$$

Номинальный фазный ток в первичной обмотке (соединенной в звезду)

$$I_{1\phi} = I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}}/(\sqrt{3}U_{1\text{ном}}) = 100/(\sqrt{3} \cdot 3,0) = 19,3 \text{ А}.$$

Номинальный фазный ток во вторичной обмотке (соединенной в треугольник)

$$I_{2\phi} = I_{2\text{ном}}/\sqrt{3} = S_{\text{ном}}/(3U_{2\text{ном}}) = 100/(3 \cdot 0,4) = 83,3 \text{ А}.$$

Таким образом, соотношение фазных токов $I_{2\phi}/I_{1\phi} = 83,3/19,3 = 4,32$ равно соотношению витков в обмотках трансформатора.

1.4. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И КПД ТРАНСФОРМАТОРА

В процессе трансформирования электрической энергии часть энергии теряется в трансформаторе на покрытие потерь. Потери в трансформаторе разделяются на электрические и магнитные.

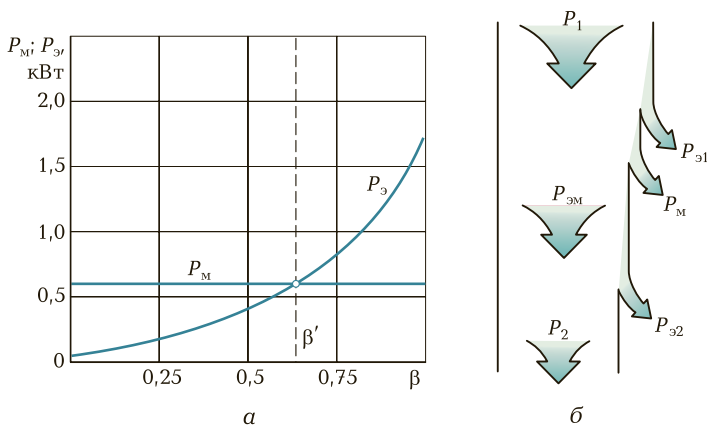


Рис. 1.9. Зависимость потерь трансформатора от его нагрузки (а) и энергетическая диаграмма (б) трансформатора

Электрические потери. Это потери в активных сопротивлениях обмоток трансформатора при прохождении по ним электрического тока. Мощность электрических потерь P_{Σ} пропорциональна квадрату тока и определяется суммой электрических потерь в первичной $P_{\Sigma 1}$ и во вторичной $P_{\Sigma 2}$ обмотках:

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} = mI_1^2 r_1 + mI_2^2 r_2, \quad (1.5)$$

где m — число фаз трансформатора (для однофазного трансформатора $m = 1$, для трехфазного $m = 3$).

Электрические потери называют *переменными*, так как их величина зависит от нагрузки трансформатора (рис. 1.9).

Магнитные потери. Происходят, главным образом, в магнитопроводе трансформатора. Причина этих потерь — систематическое перемагничивание магнитопровода переменным магнитным полем. Это перемагничивание вызывает в магнитопроводе два вида магнитных потерь: потери от гистерезиса P_{Γ} , связанные с затратой энергии на уничтожение остаточного магнетизма в ферромагнитном материале магнитопровода, и потери от вихревых токов $P_{в.т.}$ наводимых переменным магнитным полем в пластинах магнитопровода:

$$P_M = P_{\Gamma} + P_{в.т.}$$

В целях уменьшения магнитных потерь магнитопровод трансформатора выполняют из магнитномягкого ферромагнитного материала — тонколистовой электротехнической стали. При этом

магнитопровод делают шихтованным в виде пакетов из тонких пластин (полос), изолированных с двух сторон тонкой пленкой лака.

Магнитные потери от гистерезиса прямо пропорциональны частоте перемагничивания магнитопровода, т. е. частоте переменного тока ($P_{\Gamma} \equiv f$). Магнитные потери от вихревых токов пропорциональны квадрату этой частоты ($P_{\text{в.т}} \equiv f^2$). Суммарные магнитные потери принято считать пропорциональными частоте тока в степени 1,3, т. е. $P_{\text{м}} \equiv f^{1,3}$. Магнитные потери зависят также и от магнитной индукции в стержнях и ярмах магнитопровода ($P_{\text{м}} \equiv B^2$). При неизменном первичном напряжении ($U_1 = \text{const}$) магнитные потери *постоянны*, т. е. не зависят от нагрузки трансформатора (рис. 1.9, а).

При проектировании трансформатора магнитные потери определяют по удельным магнитным потерям $P_{\text{уА}}$, происходящим в 1 кг тонколистовой электротехнической стали при значениях магнитной индукции 1,0; 1,5 или 1,7 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц:

$$P_{\text{м}} = P_{\text{уА}}(B/B_{\text{x}})^2(f/50)^{1,3}m, \quad (1.6)$$

где B — фактическое значение магнитной индукции в стержне или ярме магнитопровода трансформатора, Тл; B_{x} — магнитная индукция, соответствующая принятому значению удельных магнитных потерь, например $B_{\text{x}} = 1,0$ или $1,5$ Тл; m — масса стержня или ярма магнитопровода, кг.

Значения удельных магнитных потерь указаны в стандарте на электротехническую сталь. Например, для стали марки 3411 (холоднокатаная анизотропная электротехническая сталь) толщиной 0,5 мм при $B = 1,5$ Тл и $f = 50$ Гц удельные магнитные потери $P_{1,5/50} = 2,45$ Вт/кг.

Таким образом, активная мощность P_1 , поступающая из сети в первичную обмотку трансформатора, частично расходуется на электрические потери в этой обмотке $P_{\text{э}1}$. Переменный магнитный поток вызывает в магнитопроводе трансформатора магнитные потери $P_{\text{м}}$. Оставшаяся после этого мощность, называемая **электромагнитной мощностью**: $P_{\text{эм}} = P_1 - P_{\text{э}1} - P_{\text{м}}$, передается во вторичную обмотку, где частично расходуется на электрические потери в этой обмотке $P_{\text{э}2}$. Активная мощность, поступающая в нагрузку трансформатора,

$$P_2 = P_1 - \sum P,$$

где $\sum P = P_{\text{э}1} + P_{\text{м}} + P_{\text{э}2}$ — суммарные потери в трансформаторе.

Все виды потерь, сопровождающие рабочий процесс трансформатора, показаны на энергетической диаграмме (рис. 1.9, б).

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется как отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки P_2 (полезная мощность) к активной мощности на входе первичной обмотки P_1 (подводимая мощность):

$$\eta = P_2/P_1 = (P_1 - \Sigma P)/P_1 = 1 - \Sigma P/P_1. \quad (1.7)$$

Сумма потерь

$$\Sigma P = P_{0\text{НОМ}} + \beta^2 P_{\text{к.НОМ}}. \quad (1.8)$$

Активная мощность на выходе вторичной обмотки трехфазного трансформатора (Вт)

$$P_2 = \sqrt{3}U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2, \quad (1.9)$$

где β — кратность нагрузки; $S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3}U_{2\text{НОМ}}I_{2\text{НОМ}}$ — номинальная мощность трансформатора, В·А; I_2 и U_2 — линейные значения тока, А, и напряжения, В.

Учитывая, что $P_1 = P_2 + \Sigma P$, получаем выражение для расчета КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + P_{0\text{НОМ}} + \beta^2 P_{\text{к.НОМ}}}, \quad (1.10)$$

где $\beta = I_q/I_{\text{ч.НОМ}}$.

Анализ выражения (1.10) показывает, что КПД трансформатора зависит как от величины (β), так и от характера ($\cos \varphi_2$) нагрузки. Эта зависимость иллюстрируется графиками (рис. 1.10).

Помимо рассмотренного КПД по мощности иногда пользуются понятием КПД по энергии, который представляет собой отношение количества энергии, отданной трансформатором потребителю W_2 (кВт·ч) в течение года, к энергии W_1 , полученной им от питающей электросети за это же время:

$$\eta_э = W_2/W_1.$$

КПД трансформатора по энергии характеризует эффективность эксплуатации трансформатора.

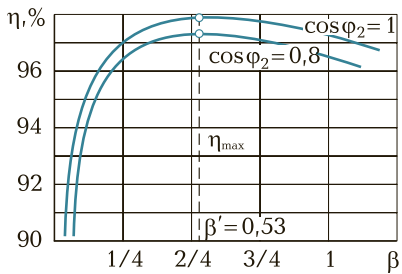


Рис. 1.10. График зависимости КПД трансформатора от нагрузки

1.5. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Обмотки ВН понижающих трансформаторов снабжают регулировочными ответвлениями, с помощью которых можно получить коэффициент трансформации, несколько отличающийся от номинального, соответствующего номинальному вторичному напряжению при номинальном первичном. Необходимость в этом объясняется тем, что напряжения в разных точках линии электропередачи, куда могут быть включены понижающие трансформаторы, отличаются друг от друга и, как правило, от номинального первичного напряжения. Кроме того, напряжение в любом месте линии может изменяться из-за колебаний нагрузки. Но так как напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора во всех случаях должно быть равно номинальному или незначительно (в пределах допустимого) отличаться от него, то потребность изменения коэффициента трансформации в процессе эксплуатации трансформатора становится необходимой. Регулировочные ответвления делают в каждой фазе либо вблизи нулевой точки, либо посередине обмотки. В первом случае на каждой фазе делают по три ответвления (рис. 1.11, а), при этом среднее ответвление соответствует номинальному коэффициенту трансформации, а два других — коэффициентам трансформации, отличающимся от номинального на $\pm 5\%$. Во втором случае обмотку разделяют на две части и делают шесть ответвлений (рис. 1.11, б). Это дает возможность кроме

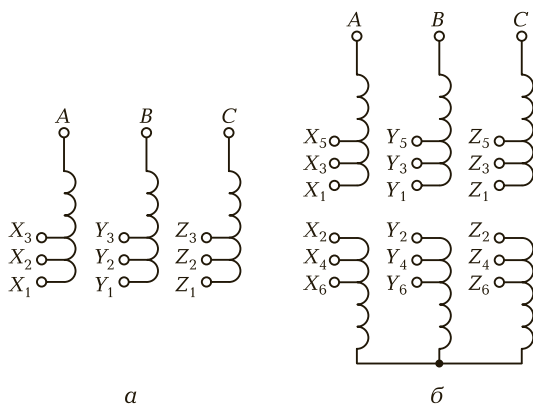


Рис. 1.11. Схемы обмоток (а) и (б) трехфазных трансформаторов с регулировочными ответвлениями

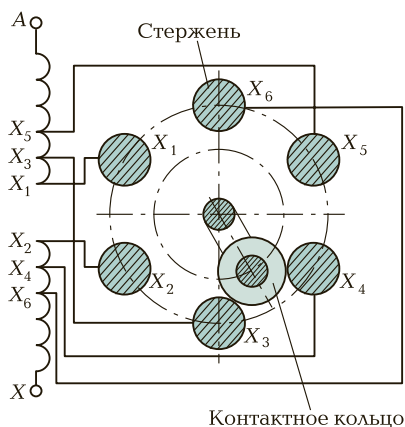


Рис. 1.12. Переключатель ответвлений ПБВ

номинального коэффициента трансформации получить еще четыре дополнительных значения, отличающихся от номинального на $\pm 2,5$ и $\pm 5\%$.

Переключать ответвления обмоток можно при отключенном от сети трансформаторе (переключение без возбуждения — ПБВ) или же без отключения трансформатора (регулирование под нагрузкой — РПН). Для ПБВ применяют переключатели ответвлений (рис. 1.12). На каждую фазу устанавливают по одному переключателю, при этом вал, вращающий контактные кольца переключателей по всем фазам одновременно, связан посредством штанги с рукояткой *б* на крышке бака трансформатора (см. рис. 1.6).

Принцип РПН основан на изменении коэффициента трансформации посредством регулировочных ответвлений. Однако переключение с одного ответвления на другое осуществляют без разрыва цепи рабочего тока. С этой целью обмотку каждой фазы снабжают специальным переключающим устройством, состоящим из реактора *Р*, двух контакторов с контактами *К1* и *К2* и переключателя с двумя подвижными контактами *П1* и *П2* (рис. 1.13, *а*).

В рабочем положении оба подвижных контактора переключателя находятся на одном ответвлении, контакты *К1* и *К2* замкнуты и рабочий ток направлен параллельно по двум половинам обмотки реактора. Если возникла необходимость переключения с одного ответвления на другое, например с *X₁* на *X₃*, то разомкнутся контакты контактора *К1* (положение 1 на рис. 1.13, *б*), подвижный контакт *П1* переключателя обесточенной ветви переводится на

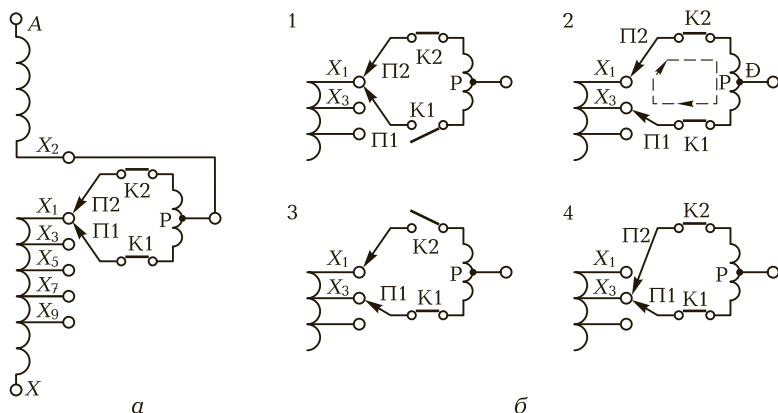


Рис. 1.13. Последовательность переключения (а и б) контактов под нагрузкой

другое ответвление и контакты контактора К1 вновь замыкаются (положение 2). В этом положении часть обмотки между ответвлениями X_1 и X_3 оказывается замкнутой. Однако ток в цепи переключающего устройства не достигает большого значения, так как он ограничивается сопротивлением реактора Р. В таком же порядке осуществляется перевод подвижного контакта К2 с ответвления X_1 на ответвление X_3 (положения 3 и 4), после чего процесс переключения заканчивается. Аппаратура РПН располагается в общем баке с трансформатором, а ее переключение автоматизируется или осуществляется дистанционно (со щита управления). Трансформаторы с РПН обычно рассчитаны для регулирования напряжения в пределах 6—10 %.

При весьма значительных мощностях трансформатора аппаратура РПН становится слишком громоздкой. В этом случае применяют регулирование напряжения с помощью *вольтдобавочного*

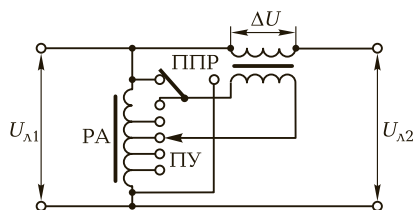


Рис. 1.14. Схема включения вольтдобавочного трансформатора

трансформатора, состоящего из трансформатора ПТ, включенного последовательно, и регулировочного автотрансформатора РА с переключающим устройством ПУ (рис. 1.14).

1.6. ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТК ТРАНСФОРМАТОРОВ

При условии намотки первичной и вторичной обмоток трансформатора в одном направлении и одноименной маркировке выводов этих обмоток ЭДС обмоток ВН E_{AX} и НН E_{ax} совпадают по фазе как показано на рис. 1.15, а. Если же в трансформаторе изменить направление намотки обмотки НН или же переставить обозначения ее выводов, то ЭДС E_{ax} окажется сдвинутой по фазе относительно ЭДС E_{AX} на 180° (рис. 1.15, б).

Сдвиг фаз между ЭДС E_{AX} и E_{ax} принято выражать *группой соединения*. Так как этот сдвиг фаз может изменяться от 0 до 360° , а кратность сдвига составляет 30° , то для обозначения группы соединения принят ряд чисел: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и 0.

Переходя к трехфазным трансформаторам, отметим, что угол смещения вектора линейной ЭДС обмотки НН по отношению к вектору линейной ЭДС обмотки ВН определяют умножением числа, обозначающего группу соединения, на 30° . Угол смещения отсчитывают от вектора ЭДС обмотки ВН по часовой стрелке до вектора ЭДС обмотки НН. Например, группа соединения 5 указывает, что вектор линейной ЭДС обмоток НН отстает по фазе от вектора линейной ЭДС обмоток ВН на угол $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$.

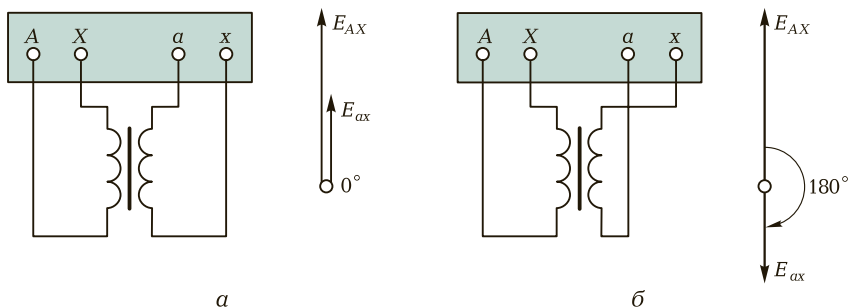


Рис. 1.15. Группы соединения обмоток однофазных трансформаторов:
 а — группа I/I — 0; б — группа I/I — 6

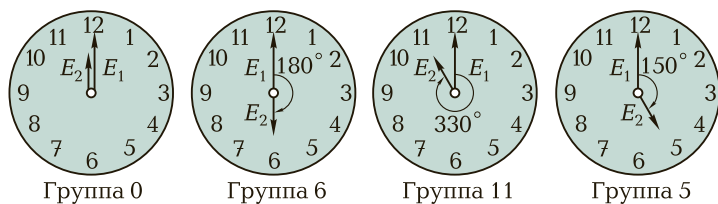


Рис. 1.16. Сравнение положения стрелок часов с обозначением групп соединения

Для лучшего понимания принятого обозначения групп соединения пользуются сравнением с часами. При этом вектор линейной ЭДС обмоток ВН соответствует минутной стрелке, установленной на цифре 12, а вектор линейной ЭДС обмоток НН — часовой стрелке (рис. 1.16). Также необходимо иметь в виду, что совпадение по фазе векторов ЭДС E_{AX} и E_{ax} эквивалентное совпадению стрелок часов на циферблате, обозначается группой 0 (а не 12). Кроме того, следует помнить, что за положительное направление вращения векторов ЭДС принято их вращение против часовой стрелки.

Таким образом, в однофазном трансформаторе возможны лишь две группы соединения: группа 0, соответствующая совпадению по фазе ЭДС E_{AX} и E_{ax} , и группа 6, соответствующая сдвигу фаз между векторами ЭДС E_{AX} и E_{ax} на 180° . Из этих групп стандартом предусмотрена лишь группа 0, она обозначается I/I — 0.

Применением разных способов соединения обмоток в трехфазных трансформаторах можно создать 12 различных групп соединения. Рассмотрим в качестве примера схему соединений «звезда—звезда» (рис. 1.17, а). Векторные диаграммы ЭДС показывают, что сдвиг между линейными ЭДС E_{AB} и E_{ab} в данном случае равен

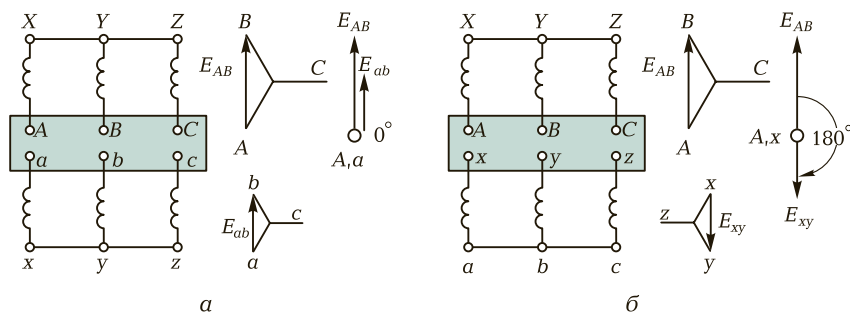


Рис. 1.17. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы:

а — для группы Y/Y — 0; б — для группы Y/Y — 6

нулю. В этом можно убедиться, совместив точки A и a при наложении векторных диаграмм ЭДС обмоток ВН и НН. Следовательно, при указанных схемах соединения обмоток имеет место группа 0; обозначается $Y/Y - 0$. Если же на стороне НН в нулевую точку соединить зажимы a, b и c , а снимать ЭДС с зажимов x, y и z , то ЭДС E_{ab} изменит фазу на 180° и трансформатор будет принадлежать группе 6 ($Y/Y - 6$) (рис. 1.17, б).

При соединении обмоток «звезда — треугольник», показанном на рис. 1.18, а, имеет место группа 11 ($Y/\Delta - 11$). Если же поменять местами начала и концы фазных обмоток НН, то вектор \dot{E}_{ab} повернется на 180° и трансформатор будет относиться к группе 5 ($Y/\Delta - 5$) (рис. 1.18, б).

При одинаковых схемах соединения обмоток ВН и НН, например Y/Y или Δ/Δ , получают четные группы соединения, а при неодинаковых схемах, например Y/Δ или Δ/Y , — нечетные.

Рассмотренные четыре группы соединения (0, 6, 11 и 5) называют *основными*. Из каждой основной группы соединения методом круговой перемаркировки выводов на одной стороне трансформатора, например на стороне НН (без изменения схемы соединения), можно получить по две производные группы. Например, если в трансформаторе с группой соединения $Y/Y - 0$ (см. рис. 1.17, а) выводы обмотки НН перемаркировать и вместо последовательности abc принять последовательность sab , то вектор ЭДС E_{ab} повернется на 120° , при этом получим группу соединения $Y/Y - 4$. Если же выводы обмоток НН перемаркировать в последовательность bca , то вектор повернется еще на 120° , а всего на 240° ; т. е. получим группу $Y/Y - 8$.

Аналогично от основной группы 6 путем круговой перемаркировки получают производные группы 10 и 2, от основной группы

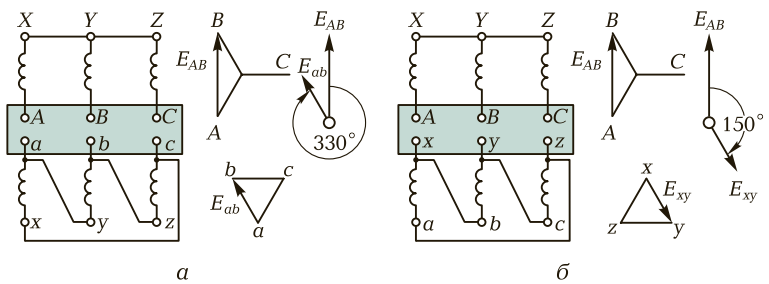


Рис. 1.18. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы:
 а — для группы $Y/\Delta - 11$; б — для группы $Y/\Delta - 5$

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов ЭДС		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	

Рис. 1.19. Схемы и группы соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов

11 — производные группы 3 и 7, от основной группы 5 — производные группы 9 и 1.

Основные группы соединения имеют некоторое преимущество перед производными, так как предусматривают одноименную маркировку выводов обмоток, расположенных на одном стержне. Это уменьшает вероятность ошибочных присоединений. Однако не все группы соединения имеют практическое применение в трехфазных трансформаторах. Стандарт определяет схемы и группы соединения, применяемые для силовых двухобмоточных трансформаторов общепромышленного назначения (рис. 1.19).

Соединяя обмотки НН в зигзаг в сочетании с соединением обмотки ВН в звезду или треугольник, можно получить практически любой угол сдвига фаз между линейными ЭДС обмоток ВН и НН.

Этого достигают разделением обмотки НН на две части с различным соотношением витков в этих частях.

При изготовлении или в процессе эксплуатации трансформаторов иногда возникает необходимость в опытной проверке группы соединения. Существует несколько методов такой проверки, но наиболее распространены методы фазометра и вольтметра.

Метод фазометра. Основан на непосредственном измерении угла фазового сдвига между соответствующими линейными напряжениями (ЭДС) обмоток ВН и НН с помощью фазометра ϕ , включенного по схеме, показанной на рис. 1.20, а. Параллельную обмотку фазометра $U-U$ подключают к стороне ВН, а последовательную обмотку $I-I$ — к стороне НН. Для ограничения тока в последовательной обмотке ее включают через добавочное сопротивление $r_{доб}$. Затем трансформатор включают в сеть с симметричным трехфазным напряжением. Для удобства измерений желательно, чтобы фазометр имел полную (360°) шкалу.

Метод вольтметра. Непосредственного измерения угла фазового сдвига между линейными напряжениями (ЭДС) этот метод не дает. Это *косвенный* метод и он основан на измерении вольтметром напряжений (ЭДС) между одноименными выводами обмоток ВН и НН. Если проверяют группу соединения $Y/Y-0$ (рис. 1.20, б), то, соединив проводом выводы А и а, измеряют напряжение U_{b-B} (между выводами *b* и *B*) и U_{c-C} (между выводами *c* и *C*). Если предполагаемая группа соединения $Y/Y-0$ соответствует фактической, то напряжения (В)

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{ab}(k_\lambda - 1), \tag{1.11}$$

где $k_\lambda = U_{AB}/U_{ab}$ — отношение линейных напряжений (ЭДС) обмоток ВН и НН, т. е. коэффициент трансформации линейных напряжений (ЭДС).

Если проверяют группы соединения 6, 11 или 5, то для измеренных значений напряжений пользуются формулами:

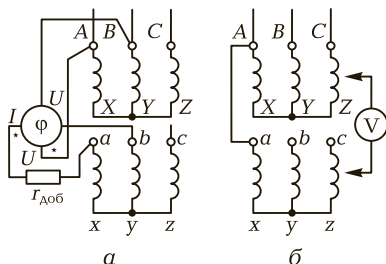


Рис. 1.20. Проверка группы соединения $Y/Y-0$ методами фазометра (а) и вольтметра (б)

группа Y/Y — 6

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{xy}(k_{\lambda} + 1); \quad (1.12)$$

группа Y/Δ — 11

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{ab}\sqrt{1 - \sqrt{3}k_{\lambda} + k_{\lambda}^2}; \quad (1.13)$$

группа Y/Δ — 5

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{ab}\sqrt{1 + \sqrt{3}k_{\lambda} + k_{\lambda}^2}, \quad (1.14)$$

где U_{ab} и U_{xy} — линейные напряжения на выводах обмоток НН, В.

Если условия равенства напряжений по результатам измерений и приводимым формулам не соблюдаются, то это свидетельствует о нарушениях в маркировке выводов трансформатора.

1.7. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Параллельная работа двух или нескольких трансформаторов состоит в параллельном соединении их обмоток как на первичной, так и на вторичной сторонах. При параллельном соединении одноименные зажимы трансформаторов присоединяют к одному и тому же проводу сети (рис. 1.21, а). Применение нескольких параллельно включенных трансформаторов вместо одного трансформатора суммарной мощности необходимо для обеспечения бесперебойного энергоснабжения в случае аварии в каком-либо трансформаторе или отключения его для ремонта. Это также целесообразно при работе трансформаторной подстанции с переменным графиком нагрузки, когда мощность нагрузки значительно меняется в различные часы суток. В этом случае при уменьшении нагруз-

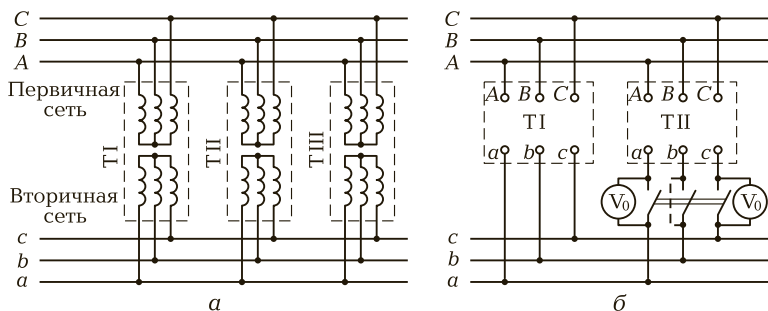


Рис. 1.21. Включение трансформаторов (а и б) на параллельную работу

ки можно отключить один или несколько трансформаторов для того, чтобы нагрузка оставшихся включенными трансформаторов была близка к номинальной. В итоге эксплуатационные показатели работы трансформаторов (КПД и $\cos \varphi_2$) будут сохраняться достаточно высокими. Для того чтобы нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределялась пропорционально их номинальным мощностям, допускается параллельная работа двухобмоточных трансформаторов при следующих условиях.

1. При одинаковом первичном напряжении вторичные напряжения должны быть равны. Другими словами, трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации: $k_I = k_{II} = k_{III} = \dots$ При несоблюдении этого условия, даже в режиме холостого хода, между параллельно включенными трансформаторами возникает уравнивающий ток, обусловленный разностью вторичных напряжений трансформаторов.

При нагрузке трансформаторов уравнивающий ток накладывается на нагрузочный. При этом трансформатор с более высоким вторичным напряжением холостого хода оказывается перегруженным, а трансформатор равной мощности, но с меньшим вторичным напряжением — недогруженным. Так как перегрузка трансформаторов недопустима, то приходится снижать общую нагрузку трансформаторов. При значительной разнице коэффициентов трансформации нормальная работа трансформаторов становится практически невозможной. Однако стандарт допускает включение на параллельную работу трансформаторов с различными коэффициентами трансформации, если их разница не превышает $\pm 0,5\%$ их среднего значения:

$$\Delta k = [(k_I - k_{II})/k]100 \leq 0,5\%, \quad (1.15)$$

где $k = \sqrt{k_I k_{II}}$ — среднее геометрическое значение коэффициентов трансформации.

2. Трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения. При несоблюдении этого условия вторичные линейные напряжения трансформаторов окажутся сдвинутыми по фазе относительно друг друга и в цепи трансформаторов появится разностное напряжение ΔU , под действием которого возникнет значительный уравнивающий ток.

3. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания, т.е. $u_{кI} = u_{кII} = u_{кIII} = \dots$ Соблюдение этого условия необходимо для того, чтобы общая нагрузка распределялась между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям.

При неравенстве напряжений короткого замыкания параллельно работающих трансформаторов больше нагружается трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания. В итоге это ведет к перегрузке одного трансформатора (с меньшим u_k) и недогрузке другого (с большим u_k). Чтобы не допустить перегрузки трансформатора, необходимо снизить общую нагрузку. Таким образом, неравенство напряжений короткого замыкания не допускает полного использования по мощности параллельно работающих трансформаторов.

Учитывая, что практически не всегда можно подобрать трансформаторы с одинаковыми напряжениями короткого замыкания, стандарт допускает включение трансформаторов на параллельную работу при разнице напряжений короткого замыкания не более чем 10 % их среднего арифметического значения. Разница в напряжениях короткого замыкания трансформаторов тем больше, чем больше эти трансформаторы отличаются друг от друга по мощности. Поэтому стандарт рекомендует, чтобы отношение номинальных мощностей трансформаторов, включенных параллельно, было не более чем 3:1.

Помимо соблюдения указанных трех условий необходимо перед включением трансформаторов на параллельную работу проверить порядок чередования фаз, который должен быть одинаковым у всех трансформаторов.

Соблюдение всех перечисленных условий проверяется *фазировкой трансформаторов*, сущность которой состоит в том, что одну пару противоположно расположенных зажимов на рубильнике, например среднюю (рис. 1.21, б), соединяют проводом и с помощью вольтметра V_0 (нулевой вольтметр) измеряют напряжение между оставшимися несоединенными парами зажимов рубильника. Если вторичные напряжения трансформаторов равны, их группы соединения одинаковы и порядок следования фаз у них один и тот же, то показания вольтметра V_0 равны нулю. В этом случае трансформаторы можно подключать на параллельную работу. Если вольтметр V_0 покажет некоторое напряжение, то необходимо выяснить, какое из условий параллельной работы нарушено. Необходимо устранить это нарушение и вновь провести фазировку трансформаторов. Следует отметить, что при нарушении порядка следования фаз вольтметр V_0 покажет двойное линейное напряжение. Это необходимо учитывать при подборе вольтметра, предел измерения которого должен быть не менее двойного линейного напряжения на вторичной стороне трансформаторов.

Общая нагрузка всех включенных на параллельную работу трансформаторов S не должна превышать суммарной номинальной мощности этих трансформаторов: $S \leq \sum S_{\text{НОМ}x}$.

Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами определяется следующим образом:

$$S_x = S S_{\text{НОМ}x} / \left[u_{\text{кк}} \sum (S_{\text{НОМ}x} / u_{\text{кк}}) \right], \quad (1.16)$$

где S_x — нагрузка одного из параллельно работающих трансформаторов, $\text{kB} \cdot \text{A}$; S — общая нагрузка всей параллельной группы, $\text{kB} \cdot \text{A}$; $S_{\text{НОМ}x}$ — номинальное значение мощности данного трансформатора, $\text{kB} \cdot \text{A}$; $u_{\text{кк}}$ — напряжение короткого замыкания данного трансформатора, %.

В выражении (1.16)

$$\sum (S_{\text{НОМ}x} / u_{\text{кк}}) = (S_{\text{НОМ}I} / u_{\text{кк}I}) + (S_{\text{НОМ}II} / u_{\text{кк}II}) + \dots \quad (1.17)$$

Пример 1.3. Три трехфазных трансформатора с одинаковыми группами соединения включены параллельно (см. рис. 1.21, а) на общую нагрузку 5000 $\text{kB} \cdot \text{A}$. Трансформаторы имеют следующие данные: $S_{\text{НОМ}I} = 1000 \text{ kB} \cdot \text{A}$, $u_{\text{кк}I} = 6,5\%$, $S_{\text{НОМ}II} = 1800 \text{ kB} \cdot \text{A}$, $u_{\text{кк}II} = 6,65\%$, $S_{\text{НОМ}III} = 2200 \text{ kB} \cdot \text{A}$, $u_{\text{кк}III} = 6,3\%$. Определить нагрузку каждого трансформатора.

Решение. По формуле (1.17) определим

$$\sum (S_{\text{НОМ}x} / u_{\text{кк}}) = 1000/6,5 + 1800/6,65 + 2200/6,3 = 775.$$

По (1.16) определим нагрузку каждого трансформатора:

$$S_I = 5000 \cdot 1000 / (6,5 \cdot 775) = 995 \text{ kB} \cdot \text{A};$$

$$S_{II} = 5000 \cdot 1800 / (6,65 \cdot 775) = 1755 \text{ kB} \cdot \text{A};$$

$$S_{III} = 5000 \cdot 2200 / (6,3 \cdot 775) = 2250 \text{ kB} \cdot \text{A},$$

т.е. третий трансформатор оказался перегруженным на $[(2250 - 2200)/2200] \cdot 100 = 2,3\%$.

Для устранения этой перегрузки следует снизить внешнюю нагрузку трансформаторов на 2,3%, т.е. уменьшить ее до $S' = S - 2,3S/100 = 5000 - 2,3 \cdot 5000/100 = 4885 \text{ kB} \cdot \text{A}$.

В этом случае суммарная мощность трансформаторов будет использована лишь на 97,7%.

1.8. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Автотрансформатор — это такой вид трансформатора, в котором помимо магнитной связи между обмотками имеется еще и *электрическая связь*.

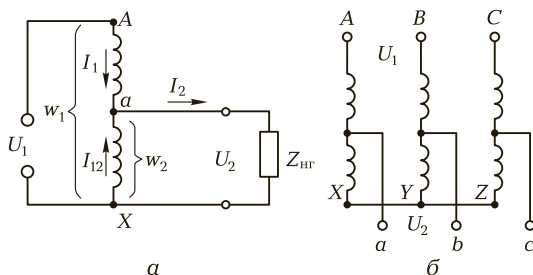


Рис. 1.22. Принципиальные схемы автотрансформаторов: а — однофазный понижающий; б — трехфазный

В отличие от двухобмоточного трансформатора автотрансформатор имеет одну обмотку, часть витков которой принадлежит одновременно первичной и вторичной цепям. На рис. 1.22, а показана принципиальная схема понижающего автотрансформатора, в котором участок обмотки aX — общая часть витков с током I_{12} .

Как и в двухобмоточном трансформаторе, в автотрансформаторе первичный ток I_1 и вторичный ток I_2 находятся в противофазе. Из этого следует, что ток I_{12} в общей части витков aX равен разности вторичного и первичного токов автотрансформатора:

$$I_{12} = I_2 - I_1. \quad (1.18)$$

Из полученного выражения (1.18) следует, что по общей части витков обмотки автотрансформатора проходит ток I_{12} , величина которого меньше вторичного тока I_2 . Если коэффициент трансформации автотрансформатора $k_A = w_{AX}/w_{ax}$ немногим больше единицы, то токи I_1 и I_2 мало отличаются друг от друга, а их разность составляет небольшую величину. Это позволяет выполнить витки w_{ax} проводом *уменьшенного* сечения.

Введем понятие *проходной мощности* автотрансформатора, представляющей собой всю передаваемую мощность $S_{пр} = U_2 I_2$ из первичной цепи во вторичную. Кроме того, различают еще расчетную мощность $S_{расч}$, представляющую собой мощность, передаваемую из первичной цепи во вторичную магнитным полем. Расчетной эту мощность называют потому, что размеры и масса магнитопровода, а следовательно и всего автотрансформатора, зависят от этой мощности. В трансформаторе вся проходная мощность является расчетной, так как между обмотками трансформатора существует лишь магнитная связь. В автотрансформаторе между первичной и вторичной цепями помимо **магнитной** связи суще-

ствует еще и *электрическая*. Поэтому расчетная мощность составляет лишь часть проходной мощности, другая ее часть передается из первичной во вторичную цепь без участия магнитного поля. В подтверждение этого разложим проходную мощность автотрансформатора $S_{\text{пр}} = U_2 I_2$ на составляющие. Воспользуемся для этого выражением вторичного тока, полученного из (1.18):

$$I_2 = I_1 + I_{12}. \quad (1.19)$$

Подставив это выражение в формулу проходной мощности, получим

$$S_{\text{пр}} = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_3 + S_{\text{расч}}, \quad (1.20)$$

где $S_3 = U_2 I_1$ — мощность, передаваемая из первичной цепи автотрансформатора во вторичную за счет электрической связи между этими цепями.

Таким образом, расчетная мощность в автотрансформаторе

$$S_{\text{расч}} = U_2 I_{12}$$

составляет лишь часть проходной. Это дает возможность для изготовления автотрансформатора использовать магнитопровод меньшего сечения, чем в трансформаторе равной мощности. При этом за счет уменьшенного сечения сердечника средняя длина витка обмотки также становится меньше, а следовательно, сокращается расход меди на выполнение обмотки автотрансформатора. Одновременно уменьшаются магнитные и электрические потери, а КПД автотрансформатора повышается.

Таким образом, автотрансформатор по сравнению с трансформатором равной мощности обладает следующими преимуществами: меньшим расходом активных материалов (медь и электротехническая сталь), более высоким КПД, меньшими размерами и, следовательно, меньшей стоимостью. У автотрансформаторов большой мощности КПД достигает 99,7 %.

Указанные преимущества автотрансформатора тем значительнее, чем больше мощность S_3 , а следовательно, чем меньше расчетная часть $S_{\text{расч}}$ проходной мощности.

Мощность S_3 , передаваемая из первичной во вторичную цепь за счет электрической связи между этими цепями, определяется выражением

$$S_3 = U_2 I_1 = U_2 I_2 / k_A = S_{\text{пр}} / k_A, \quad (1.21)$$

т. е. значение мощности S_3 обратно пропорционально коэффициенту трансформации автотрансформатора k_A .

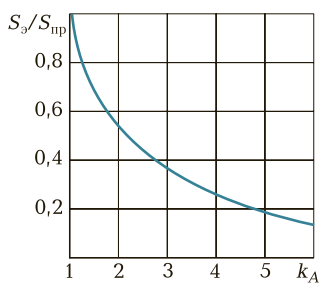


Рис. 1.23. График зависимости $S_3/S_{пр}$ от коэффициента трансформации автотрансформатора

Из графика (рис. 1.23) видно, что применение автотрансформатора дает заметные преимущества по сравнению с двухобмоточным трансформатором лишь при небольших значениях коэффициента трансформации. Например, при $k_A = 1$ вся мощность автотрансформатора передается во вторичную цепь за счет электрической связи между цепями ($S_3/S_{пр} = 1$).

Из графика рис. 1.23 следует, что наиболее целесообразно применение автотрансформаторов с коэффициентом трансформации $k_A \leq 2$. При большем коэффициенте трансформации преобладающее значение имеют недостатки автотрансформатора, состоящие в следующем.

1. Большие токи короткого замыкания в случаях понижающего автотрансформатора — при замыкании точек a и X (см. рис. 1.22, a) напряжение U_1 подводится лишь к небольшой части витков Aa , которые обладают небольшим сопротивлением короткого замыкания. В итоге ток короткого замыкания достигает чрезмерно больших значений, оказывающих на автотрансформаторы разрушающее действие. Поэтому токи короткого замыкания в автотрансформаторе должны ограничиваться сопротивлением других элементов электрической установки, включаемых в цепь автотрансформатора.

2. Электрическая связь стороны ВН со стороной НН, что требует усиленной электрической изоляции всей обмотки.

3. При использовании автотрансформаторов в схемах понижения напряжения между проводами сети НН и заземлением возникает напряжение, приблизительно равное напряжению между проводами и заземлением на стороне ВН. По этой причине, в целях обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала, нельзя применять автотрансформаторы для понижения напряжения сетей ВН до значений НН, подводимого непосредственно к потребителям.

Силовые автотрансформаторы широко применяют в линиях передачи и распределения электроэнергии для связи сетей смежных напряжений, например 110 и 220, 220 и 500 кВ и др. Такие автотрансформаторы обычно выполняют на большие мощности (до 500 МВ·А и более). Обмотки трехфазных автотрансформаторов обычно соединяют в звезду (см. рис. 1.22, б).

Автотрансформаторы применяют в электроприводе переменного тока для уменьшения пусковых токов двигателей переменного тока значительной мощности, а также для регулировки режимов работы электрометаллургических печей.

Автотрансформаторы малой мощности применяют в устройствах радио, связи и автоматики. Широкое распространение получили автотрансформаторы с переменным коэффициентом трансформации. Такие автотрансформаторы называют **регуляторами напряжения**. Электротехнической промышленностью изготавлиются регуляторы напряжения различной конструкции. Наиболее рациональной является конструкция однофазных регуляторов напряжения (РНО) типа TDGC2 и трехфазных регуляторов напряжения (РНТ) типа TSGC2 (рис. 1.24). Напряжение питания однофазных регуляторов от сети 220 В, а трехфазных регуляторов — 220 или 380 В при частоте переменного тока 50 Гц. Диапазон регу-

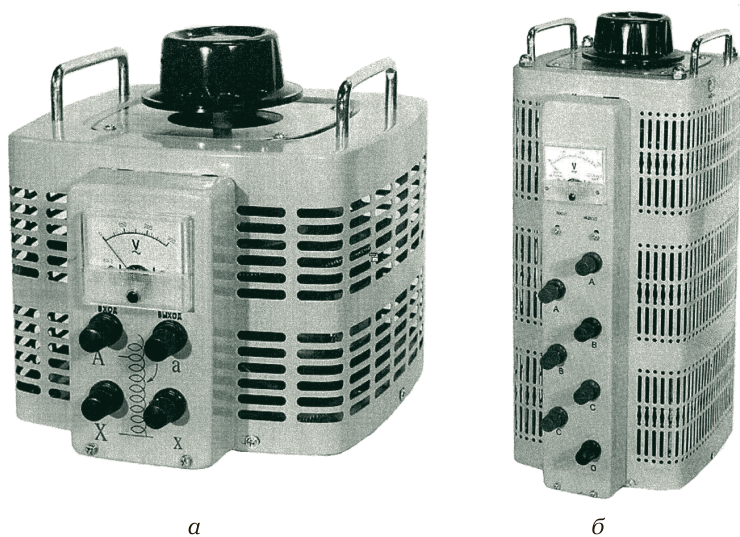


Рис. 1.24. Внешний вид регулировочных автотрансформаторов однофазного TDGC2 (а) и трехфазного TSGC2 (б) типов

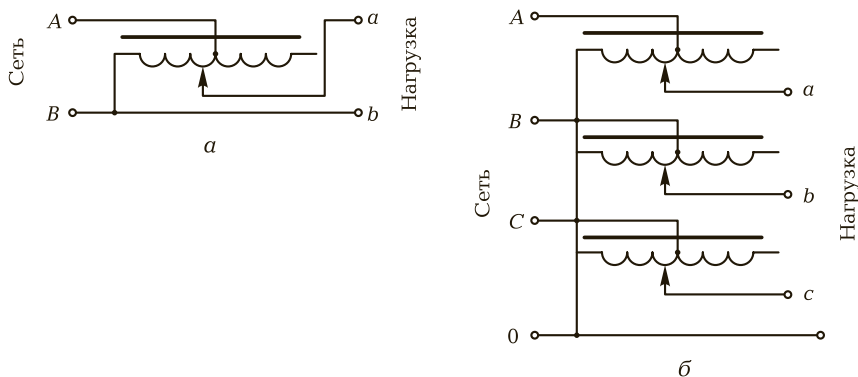


Рис. 1.25. Схемы включения регулировочных автотрансформаторов: а — однофазного; б — трехфазного

лируемого напряжения на выходе однофазного регулятора от 0 до 260 В, а трехфазного — от 0 до 450 В. Все модели регуляторов напряжения снабжены шкалой поворота ручки регулятора и вольтметром, указывающим напряжение на выходе регулятора.

Основное назначение регуляторов — применение в качестве лабораторных автотрансформаторов для регулирования, наладки и тестирования различных приборов и установок. Однофазный регулятор выполнен на тороидальном магнитопроводе с навитой катушкой из медного провода. Катушка имеет неизолированную дорожку для подвижного контакта со скользящей угольной щеткой. Трехфазный регулятор выполнен на трех тороидальных магнитопроводах, расположенных вертикально друг над другом, с катушками, соединенными звездой. Схемы включения регуляторов напряжения показаны на рис. 1.25.

1.9. СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Силовые трансформаторы общего назначения применяют для преобразования напряжения (и тока) в сетях и установках, для распределения и использования электрической энергии.

В соответствии с действующим стандартом к силовым трансформаторам относят трехфазные трансформаторы мощностью 6,3 кВ · А и более и однофазные мощностью 5 кВ · А и более.

По конструктивному признаку все силовые трансформаторы разделяют на масляные и сухие. В масляных трансформаторах активная часть (обмотки и магнитопровод) помещена в бак, заполненный трансформаторным маслом (см. рис. 1.6), которое является для трансформатора охлаждающей и изолирующей средой. В сухих трансформаторах охлаждающей и изолирующей средой служит атмосферный воздух или другой газ. Изолирующей средой в сухом трансформаторе может быть также твердый диэлектрик.

Трансформаторы изготовляют сериями, каждая серия включает трансформаторы, объединяемые одинаковым назначением и однотипностью конструкции. При обозначении типоразмеров серийных силовых трансформаторов применяют буквенные и цифровые обозначения, содержание которых необходимо знать при выборе трансформатора.

Для **масляных трансформаторов** приняты следующие обозначения:

- А — автотрансформатор (трансформатор не имеет обозначения);
- Т — трехфазный или О — однофазный;
- Н — с регулировкой напряжения под нагрузкой РПН; при отсутствии буквы Н — либо регулировка без возбуждения ПБВ, либо в трансформаторе отсутствует регулировка напряжения;
- Р — наличие в каждой фазе трансформатора расщепленной обмотки НН, т. е. обмотки, разделенной на две равные части. Способ охлаждения трансформатора обозначается:
- М — масляное естественное;
- Д — масляное с дутьем и естественной циркуляцией масла;
- ДЦ — то же, но с принудительной циркуляцией масла;
- МВ — масляно-водяное с естественной циркуляцией масла;
- Ц — то же, но с принудительной циркуляцией масла.

После буквенного обозначения следуют цифры, записанные дробью: в числителе указана номинальная мощность трансформатора, кВ·А, а в знаменателе — напряжение обмотки ВН, кВ.

В качестве примера расшифруем обозначения нескольких силовых масляных трансформаторов:

- ТМ—2500/35 — трансформатор трехфазный с масляным естественным охлаждением, номинальной мощностью 2500 кВ·А, напряжение на стороне ВН 35 кВ;
- ТДЦ—80000/35 — трансформатор трехфазный, охлаждение масляное с принудительной циркуляцией масла, номинальной мощностью 80000 кВ·А, напряжение на стороне ВН 35 кВ;

- ТРДЦН—125 000/110 — трансформатор трехфазный с расщепленной обмоткой с регулировкой напряжения под нагрузкой, охлаждение масляное с принудительной циркуляцией масла, номинальной мощностью 125 000 кВ·А, напряжение на стороне ВН 110 кВ.

При выборе трансформатора пользуются каталогами на данную серию трансформаторов, где помимо технических данных трансформаторов этой серии указаны назначение и области применения трансформаторов, особенности конструкции, условия эксплуатации, завод-изготовитель.

В таблице технических данных указано обозначение типоразмеров, номинальная мощность, напряжения на сторонах ВН и НН, напряжение короткого замыкания, потери холостого хода и короткого замыкания, ток холостого хода (%), габаритные размеры, масса трансформатора и масса масла.

Сухие трансформаторы изготавливают мощностью не более 1 600 кВ·А. Они снабжены кожухом, защищающим трансформатор от попадания во внутрь посторонних предметов и предохраняющим обслуживающий персонал от случайного прикасания к частям, находящимся под напряжением. Эти трансформаторы рассчитаны для эксплуатации в закрытых помещениях с влажностью воздуха не более 80 % при отсутствии агрессивных веществ и запыленности.

Сухие трансформаторы обозначают буквами ТСЗ — трехфазный трансформатор сухого защищенного исполнения. На стороне ВН возможны напряжения 380, 500, 660, 1 000 В; на стороне НН применяются напряжения 230 и 400 В. Например, ТСЗ—100/0,66 — трехфазный трансформатор сухого защищенного исполнения номинальной мощностью 100 кВ·А с первичным напряжением 660 В.

Большую группу трансформаторов составляют трансформаторы *малой мощности*: однофазные мощностью до 4 кВ·А и трехфазные мощностью до 5 кВ·А. Эти трансформаторы изготавливают крупными партиями с большим многообразием серий, что объясняется весьма разнообразными областями их применения: в устройствах радио, связи, автоматики, сигнализации, для местного освещения рабочих мест, в бытовых приборах и т. д. Примером этому являются широко используемые трансформаторы серии ОСМ — однофазные, сухие, многоцелевого назначения.

Отсутствие у трансформаторов вращающихся частей уменьшает нагрев трансформатора из-за отсутствия механических потерь, но это же обстоятельство усложняет процесс охлаждения,

так как исключает применение в трансформаторах самовентиляции. По этой причине основным способом охлаждения трансформаторов является естественное охлаждение. Однако в трансформаторах значительной мощности в целях повышения удельных электромагнитных нагрузок применяют более эффективные методы охлаждения.

Наибольшее распространение получили следующие способы охлаждения трансформаторов.

Естественное воздушное охлаждение сухих трансформаторов. Все нагреваемые части трансформатора непосредственно соприкасаются с воздухом. Их охлаждение происходит за счет излучения теплоты и естественной конвекции воздуха. Обычно такие трансформаторы снабжают защитным кожухом, имеющим жалюзи или же отверстия, закрытые сеткой, что создает направленное движение охлаждающему потоку воздуха. Этот способ охлаждения применяют в трансформаторах низкого напряжения при их установке в сухих закрытых помещениях.

Искусственное воздушное охлаждение. Такой способ используют в трансформаторах, работающих в условиях интенсивного нагрева (сварочные, печные трансформаторы и т. д.) посредством встраиваемых в трансформатор вентиляторов.

Естественное масляное охлаждение. Магнитопровод с обмотками помещают в бак, заполненный трансформаторным маслом, которое омывает нагреваемые части трансформатора. Частицы масла, соприкасаясь с обмотками и магнитопроводом трансформатора, нагреваются и поднимаются в верхнюю часть бака. Их место занимают более холодные частицы масла. Масло, поднявшееся вверх, соприкасаясь с крышкой и стенками бака, отдает свое тепло, охлаждается и опускается в нижнюю часть бака. Таким образом создается непрерывная циркуляция масла в баке. Для увеличения охлаждаемой поверхности бак делают ребристым или же применяют трубчатые баки (см. рис. 1.6). В трансформаторах большой единичной мощности трубы объединяют в радиаторы (радиаторные баки). Нагретые частицы масла поднимаются в верхнюю часть бака и по трубам опускаются вниз. При этом, соприкасаясь со стенками труб, масло охлаждается.

Трансформаторное масло обладает высокими электроизоляционными свойствами, поэтому, пропитывая изоляцию обмоток, оно улучшает ее свойства и повышает надежность трансформаторов. Следует заметить, что масляное охлаждение усложняет и удорожает эксплуатацию трансформаторов, так как требует систематического контроля качества и периодической замены масла.

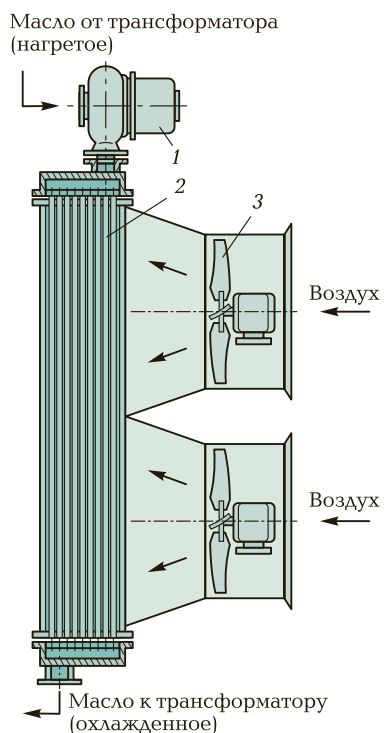


Рис. 1.26. Масляное охлаждение трансформатора с дутьем и принудительной циркуляцией масла:

1 — насос; 2 — охладители; 3 — вентилятор

Масляное охлаждение с дутьем. Трансформаторы снабжают электрическими вентиляторами, которые обдувают радиаторы бака.

Конвекция масла внутри бака остается естественной. Этот вид охлаждения позволяет увеличить единичную мощность трансформатора на 40...50%. Обычно масляное охлаждение с дутьем применяют в трансформаторах мощностью свыше 10 МВ·А.

При снижении нагрузки трансформатора на 50...60% вентиляторы можно отключить, т.е. перейти на естественное масляное охлаждение.

Масляное охлаждение с дутьем и принудительной циркуляцией масла. С помощью насоса 1 (рис. 1.26) создают принудительную циркуляцию трансформаторного масла через специальные охладители 2, собранные из трубок.

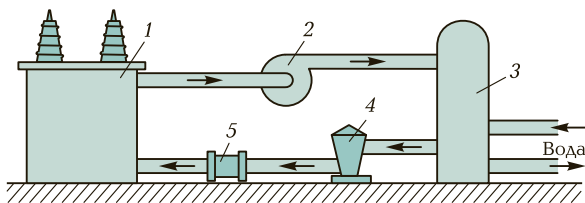


Рис. 1.27. Масляно-водяное охлаждение трансформатора:

1 — трансформатор; 2 — насос; 3 — охладитель; 4 — воздухоохладитель; 5 — фильтр

Одновременно необходимое количество вентиляторов 3 создаст направленные потоки воздуха, обдувающие поверхность труб охладителя.

Масляно-водяное охлаждение (рис. 1.27). Нагретое в трансформаторе 1 масло посредством насоса 2 прогоняется через охладитель 3, в котором циркулирует вода. Это наиболее эффективный способ охлаждения, так как коэффициент теплопередачи от масла в воду значительно выше, чем в воздух. Одновременно масло проходит через воздухоохладитель 4 и фильтр 5, где освобождается от нежелательных включений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков принцип работы трансформатора?
2. Почему трансформаторы не работают от сети постоянного тока?
3. Из каких частей состоит активная часть трансформатора? Каковы их назначение и конструкция?
4. Каково назначение трансформаторного масла?
5. Как определить номинальные токи и номинальное вторичное напряжение трансформатора?
6. Почему с увеличением тока нагрузки трансформатора увеличивается ток в его первичной обмотке?
7. Объясните принцип регулирования напряжения под нагрузкой.
8. Каков порядок переключения контактов переключающего устройства при регулировании напряжения под нагрузкой?
9. Объясните назначение и принцип работы вольдобавочного трансформатора.
10. Что такое группа соединения и как она обозначается?
11. Какие группы соединения предусмотрены стандартом?

12. Как из основной группы соединения можно получить производную?
13. Как изменится отношение линейных напряжений трансформатора, если нулевую группу соединения изменить на 11-ю?
14. Какие условия необходимо соблюдать при включении трансформаторов на параллельную работу?
15. Что такое фазировка трансформатора и как она выполняется?
16. Как расшифровывается буквенное обозначение типоразмера масляного трансформатора?
17. Какие способы охлаждения применяют в масляных трансформаторах?
18. Как происходит естественное масляное охлаждение трансформаторов большой единичной мощности?

АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

2.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Асинхронные машины получили наиболее широкое применение в современных электрических установках и являются самым распространенным видом бесколлекторных электрических машин переменного тока. Как и любая электрическая машина, асинхронные машины обратимы и могут работать как в генераторном, так и двигательном режимах. Однако преобладающее применение получили асинхронные двигатели, составляющие основу современного электропривода.

Области применения асинхронных двигателей весьма широкие: от бытовых электроприборов до крупных станков и агрегатов — металлорежущих станков, горного оборудования (экскаваторов, дробилок, мельниц), подъемных устройств, транспортных средств и т.д. В соответствии с этим единичная мощность асинхронных двигателей, выпускаемых электромашиностроительной промышленностью, составляет диапазон от долей ватта до тысяч киловатт.

Наибольшее применение имеют трехфазные асинхронные двигатели общепромышленного назначения, рассчитанные на работу от сети промышленной частоты (50 Гц). Широкому использованию асинхронных двигателей в современном электроприводе способствует разработка ряда электронных устройств, позволяющих расширить регулировочные свойства двигателей.

Следует иметь в виду, что асинхронные двигатели не только наиболее надежные по сравнению с двигателями другого типа действия, но и самые дешевые. Поэтому применение асинхронных двигателей способствует росту надежности электропривода и снижает капитальные затраты на его создание.

Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося ротора, разделенных воз-

душным зазором. Каждая из этих частей имеет сердечник и обмотку. При этом обмотка статора включается в сеть и является как бы первичной, а обмотка ротора — вторичной, так как энергия в нее поступает из обмотки статора за счет магнитной связи между этими обмотками.

Ротор и статор разделены воздушным зазором. При включении обмотки статора в сеть трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле статора, частота вращения которого n_1 определяется выражением

$$n_1 = f_1 \cdot 60 / p, \quad (2.1)$$

где f_1 — частота напряжения переменного тока, Гц; p — число пар полюсов магнитного поля.

Вращающееся поле статора сцепляется с обмоткой ротора и наводит в ней ЭДС. Если обмотка ротора замкнута, то ЭДС ротора создает в стержнях обмотки ротора токи. Взаимодействие этих токов с полем статора создает на роторе электромагнитные силы, которые стремятся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Совокупность сил создает на роторе электромагнитный момент M , приводящий его во вращение с частотой n_2 . Вращение ротора посредством вала передается рабочему механизму. Таким образом, электрическая энергия, поступающая из сети в обмотку статора, преобразуется в механическую энергию вращения ротора двигателя.

Направление вращения магнитного поля статора, а следовательно, и направление вращения ротора, зависят от порядка следования фаз напряжения, подводимого к обмотке статора. Частота вращения ротора n_2 , называемая *асинхронной*, всегда меньше частоты вращения магнитного поля n_1 , так как только в этом случае в стержнях обмотки ротора асинхронного двигателя индуцируется ЭДС.

Двигательный режим. Из рассмотренного ранее принципа действия асинхронного двигателя следует, что непременным условием работы асинхронного двигателя является наличие в нем магнитного поля, вращающегося с частотой n_1 (синхронная частота вращения). Это поле создается при включении трехфазной обмотки статора в сеть трехфазного переменного тока. Процесс наведения вращающегося магнитного поля называют *в о з б у ж д е н и е м а с и н х р о н н о й м а ш и н ы*.

Двигательный режим асинхронной машины, являющийся ее основным режимом, иллюстрирует рис. 2.1, а.

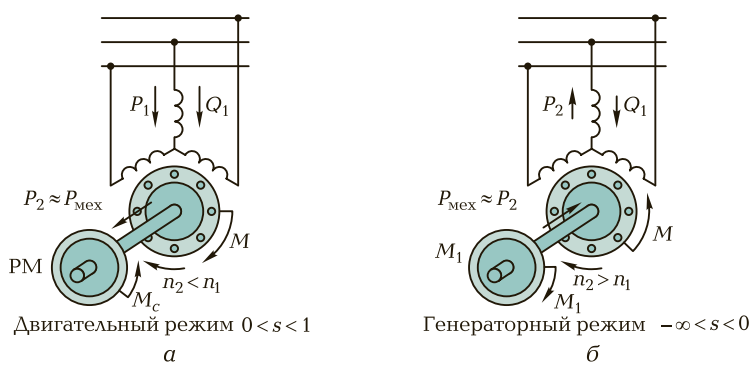


Рис. 2.1. Асинхронная машина в двигательном (а) и генераторном (б) режимах

Одним из основных параметров электрических машин является скорость вращательного движения. Для характеристики *вращательного движения* приняты понятия *угловая скорость вращения* ω , рад/с, и *частота вращения* n , мин⁻¹.

Угловую скорость вращения обычно применяют при рассмотрении теоретических вопросов. В технической документации (каталоги, справочники, технические условия на электротехнические устройства и т. д.) и в производственной практике используют частоту вращения n . Угловая скорость и частота вращения связаны зависимостью:

$$\omega = 2\pi n / 60 = 0,105n.$$

Весьма важным параметром асинхронной машины является **скольжение** — величина, характеризующая разность частот вращения вращающегося поля статора n_1 и ротора n_2 :

$$s = (n_1 - n_2) / n_1. \tag{2.2}$$

Скольжение выражают в долях единицы либо в %. В последнем случае величину, полученную по (2.2), следует умножить на 100. С увеличением момента нагрузки M_c , противодействующего вращению вала двигателя, частота вращения ротора n_2 уменьшается. Следовательно, скольжение асинхронного двигателя зависит от механической нагрузки на валу двигателя и может изменяться в диапазоне $0 < s < 1$.

При включении асинхронного двигателя в сеть в начальный момент времени ротор под влиянием сил инерции неподвижен ($n_2 = 0$). При этом скольжение s равно единице. В режиме работы

двигателя без нагрузки на валу (режим холостого хода) ротор вращается с частотой n_2 лишь немного меньшей синхронной частоты вращения n_1 и скольжение весьма мало отличается от нуля ($s \approx 0$). Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке двигателя, называют *номинальным скольжением* $s_{\text{ном}}$. Для асинхронных двигателей общего назначения $s_{\text{ном}} = 1 \dots 8 \%$, при этом меньшие значения номинального скольжения соответствуют двигателям большей мощности.

Преобразовав выражение (2.2), получим формулу для определения частоты вращения ротора двигателя, мин^{-1} :

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (2.3)$$

Пример 2.1. Трехфазный асинхронный двигатель с числом полюсов $2p = 4$ работает от сети с частотой тока $f_1 = 50$ Гц. Определить частоту вращения двигателя при номинальной нагрузке, если скольжение при этом составляет 6%.

Решение. 1. Синхронная частота вращения по (2.1):

$$n_1 = f_1 \cdot 60 / p = 50 \cdot 60 / 2 = 1500 \text{ мин}^{-1}.$$

2. Номинальная частота вращения вала двигателя по (2.3):

$$n_{\text{ном}} = n_1(1 - s_{\text{ном}}) = 1500(1 - 0,06) = 1412 \text{ мин}^{-1}.$$

Генераторный режим. В соответствии с принципом обратимости электрических машин асинхронные машины могут работать не только в двигательном, но и в генераторном режимах. Для этого необходимо возбудить асинхронную машину, подключив ее обмотку статора к трехфазной сети, и посредством приводного двигателя (турбина, двигатель внутреннего сгорания) привести во вращение ротор машины в направлении вращения магнитного поля статора с частотой, превышающей частоту вращения этого поля $n_2 > n_1$. В этих условиях характер движения ротора относительно поля статора изменится (по сравнению с двигательным режимом работы), так как ротор будет обгонять поле статора ($n_2 > n_1$), и скольжение станет отрицательным, т. е.

$$s = (-n_2 + n_1) / n_1.$$

ЭДС, наведенная вращающимся полем статора в обмотке ротора вращающегося с частотой $n_2 > n_1$, изменит свое направление и превысит напряжение сети. При этом асинхронная машина из потребителя электроэнергии превратится в источник и будет отдавать в сеть электрическую мощность, являющуюся преобразованной механической мощностью приводного двигателя. Другими словами, асинхронная машина будет работать в генераторном ре-

жиге. Электромагнитный момент на роторе M также изменит свое направление, т. е. будет направлен встречно вращающемуся магнитному полю статора и станет тормозящим по отношению к вращающемуся моменту приводного двигателя M_1 (рис. 2.1, б). В этом случае механическая мощность приводного двигателя $P_{\text{мех}}$ в основной своей части будет преобразована в активную электрическую мощность переменного тока.

Скольжение асинхронной машины в генераторном режиме может изменяться в диапазоне $-\infty < s < 0$, т. е. оно может принимать любые отрицательные значения. На практике генераторный режим асинхронной машины нашел применение при генераторном рекуперативном торможении асинхронного двигателя с отдачей электроэнергии в сеть. Таким образом, основным режимом асинхронной машины является двигательный режим. По этой причине теорию асинхронных машин принято рассматривать применительно к двигательному режиму. Что же касается генераторов переменного тока, то наибольшее распространение получили синхронные генераторы.

По своей конструкции асинхронные двигатели подразделяют на два вида: двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора и двигатели с фазной обмоткой ротора. Рассмотрим устройство *трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором* (рис. 2.2). Двигатели этого вида имеют наиболее широкое применение.

Неподвижная часть двигателя — статор — состоит из *корпуса 7* и *сердечника 6* с трехфазной обмоткой. Корпус двигателя отливают из алюминиевого сплава или чугуна, либо делают сварным. Рассматриваемый двигатель имеет закрытое обдуваемое исполнение. Поэтому поверхность его корпуса имеет ряд продольных ребер, увеличивающих поверхность охлаждения двигателя.

В корпусе расположен *сердечник статора 6*. В целях ослабления вихревых токов сердечник делают шихтованным из тонколистовой электротехнической стали обычно толщиной 0,5 мм. Пластины сердечника статора покрыты слоем изоляционного лака, собраны в пакет и скреплены специальными скобами или продольными сварными швами по наружной поверхности пакета. Такая конструкция сердечника способствует значительному уменьшению вихревых токов, возникающих в процессе перемагничивания сердечника вращающимся магнитным полем.

На внутренней поверхности сердечника статора имеются продольные пазы, в которых располагаются пазовые части обмотки статора, соединенные в определенном порядке лобовыми частями

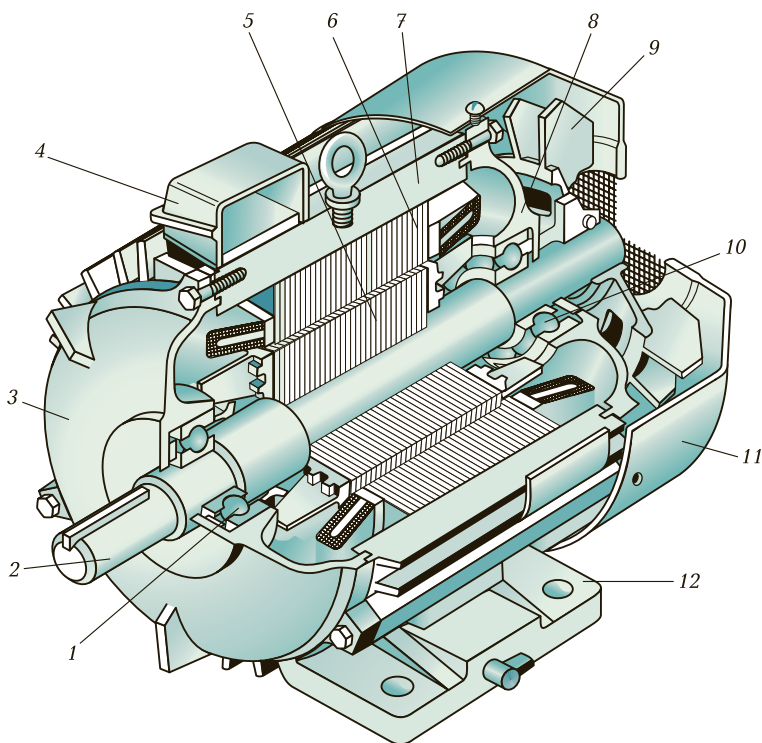


Рис. 2.2. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

1 и 10 — подшипники; 2 — вал; 3 и 8 — подшипниковые щиты; 4 — коробка выводов; 5 — сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; 6 — сердечник статора с обмоткой; 7 — корпус; 9 — вентилятор; 11 — кожух вентилятора; 12 — лапы

ми, находящимися за пределами сердечника по его торцовым сторонам.

В расточке статора расположена вращающаяся часть двигателя — ротор, состоящий из вала 2 и сердечника 5 с короткозамкнутой обмоткой. Такая обмотка, называемая «беличье колесо», представляет собой ряд металлических (алюминиевых или медных) стержней, расположенных в пазах сердечника ротора, замкнутых с двух сторон короткозамыкающими кольцами (рис. 2.3, а). Сердечник ротора также имеет шихтованную конструкцию, но листы ротора не покрыты изоляционным лаком, а имеют на своей поверхности тонкую пленку оксида. Это является достаточной изоляцией, ограничивающей вихревые токи, так как величина их не-

велика из-за малой частоты перемагничивания сердечника ротора. Например, при частоте сети 50 Гц и номинальном скольжении 6 % частота перемагничивания сердечника ротора составляет 3 Гц. Короткозамкнутая обмотка ротора в большинстве двигателей выполняется заливкой собранного сердечника ротора расплавленным алюминиевым сплавом. При этом одновременно со стержнями обмотки отливаются короткозамыкающие кольца и вентиляционные лопатки (рис. 2.3, б). Вал ротора вращается в подшипниках качения 1 и 10, расположенных в подшипниковых щитах 3 и 8 (см. рис. 2.2).

Охлаждение двигателя осуществляется методом обдува наружной поверхности корпуса. Поток воздуха создается центробежным вентилятором 9, прикрытым кожухом 11. На торцевой поверхности этого кожуха имеются отверстия для забора воздуха. Двигатели мощностью 15 кВт и более помимо закрытого делают еще и защищенного исполнения с внутренней самовентиляцией. В подшипниковых щитах этих двигателей имеются отверстия (жалюзи), через которые воздух посредством вентилятора прогоняется через внутреннюю полость двигателя. При этом воздух «омывает» нагретые части (обмотки, сердечники) двигателя. В этом случае охлаждение более эффективно, чем при наружном обдуве корпуса двигателя.

Концы обмоток фаз выводят на зажимы коробки выводов 4. Обычно асинхронные двигатели предназначены для включения в трехфазную сеть на два разных напряжения, отличающиеся в $\sqrt{3}$ раз. Например, двигатель рассчитан для включения в сеть на

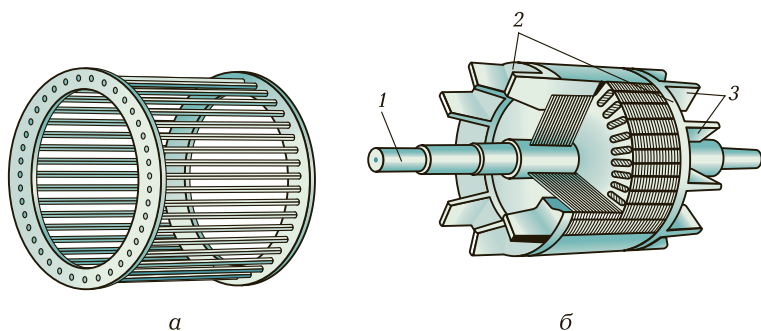


Рис. 2.3. Короткозамкнутый ротор:

а — обмотка «беличьей клетка»; б — ротор с обмоткой, выполненной методом литья под давлением: 1 — вал; 2 — короткозамыкающие кольца; 3 — вентиляционные лопатки

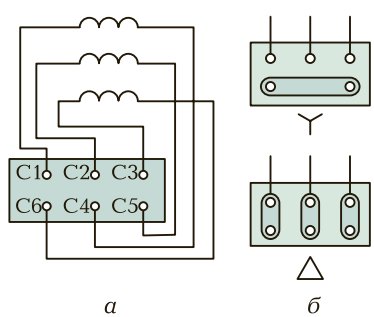


Рис. 2.4. Расположение выводов обмотки статора (а) и положение переключателей при соединении обмотки статора звездой и треугольником (б)

напряжения 380/660 В. Если в сети линейное напряжение 660 В, то обмотку статора следует соединить звездой, а если 380 В — то треугольником. В обоих случаях напряжение на обмотке каждой фазы будет 380 В. Выводы обмоток фаз располагают на панели коробки выводов таким образом, чтобы соединения обмоток фаз было удобно выполнять посредством переключателей, без перекрещивания последних (рис. 2.4). В некоторых двигателях небольшой мощности на панели коробки выводов имеется лишь три вывода. В этом случае двигатель может быть включен в сеть на одно напряжение (соединение обмотки статора такого двигателя звездой или треугольником выполнено внутри двигателя).

Монтаж двигателя в месте его установки осуществляется посредством лап 12 (см. рис. 2.2) или фланца. В последнем случае на подшипниковом щите (обычно со стороны выступающего конца вала) делают фланец с отверстиями для крепления двигателя на

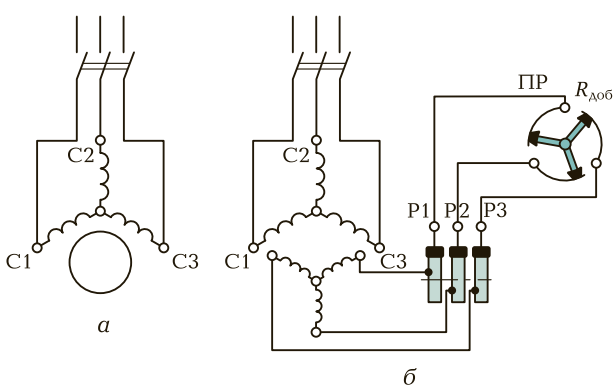


Рис. 2.5. Принципиальные схемы включения трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым (а) и фазным (б) роторами

рабочей машине. Для предохранения обслуживающего персонала от возможного поражения электрическим током двигатели снабжаются болтами заземления (не менее двух).

Принципиальная схема включения в трехфазную сеть асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором показана на рис. 2.5, а.

Другая разновидность трехфазных асинхронных двигателей — *двигатели с фазным ротором* — конструктивно отличается от рассмотренного двигателя устройством ротора (рис. 2.6). Статор этого двигателя также состоит из корпуса 3 и сердечника 4 с трехфазной обмоткой. У него имеются подшипниковые щиты 2 и 6 с подшипниками качения 1 и 7. В нижней части корпуса 3 имеются лапы 10 и коробка выводов 9. Однако ротор имеет более сложную конструкцию. На валу 8 закреплен шихтованный сердечник 5 с трехфазной обмоткой, выполненной аналогично обмотке статора. Эту обмотку соединяют звездой, а ее концы присоеди-

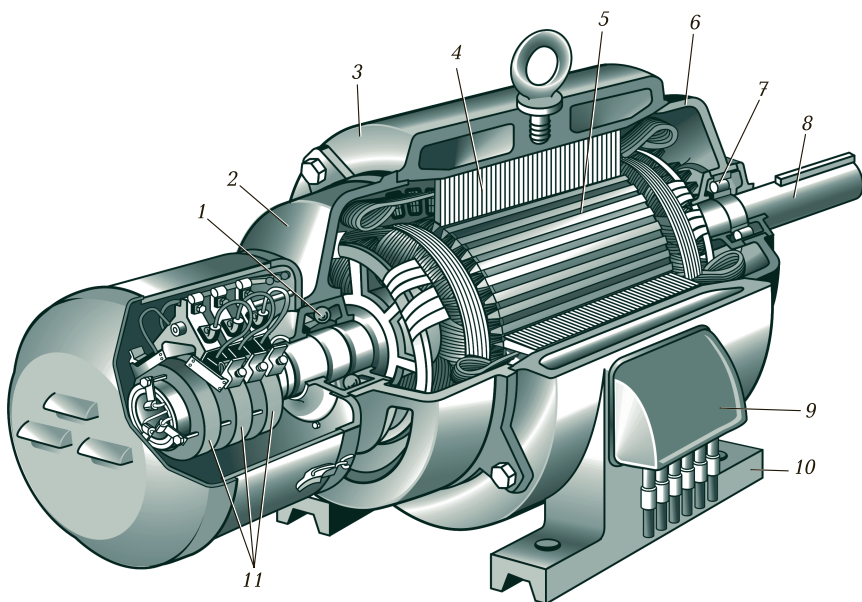


Рис. 2.6. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором:

1 и 7 — подшипники; 2 и 6 — подшипниковые щиты; 3 — корпус; 4 — сердечник статора с обмоткой; 5 — сердечник ротора; 8 — вал; 9 — коробка выводов; 10 — лапы; 11 — контактные кольца

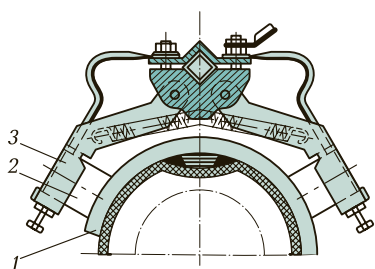


Рис. 2.7. Щеткодержатель:

1 — контактное кольцо; 2 — щетка; 3 — щеткодержатель

ют к трем контактным кольцам 11, расположенным на валу и изолированным друг от друга и от вала. Для осуществления электрического контакта с обмоткой вращающегося ротора на каждое контактное кольцо 1 (рис. 2.7) накладывают обычно две щетки 2, располагаемые в щеткодержателях 3. Каждый щеткодержатель снабжен пружинами, обеспечивающими прижатие щеток к контактному кольцу.

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию и менее надежны, но они обладают лучшими регулировочными и пусковыми свойствами, чем двигатели с короткозамкнутым ротором. Принципиальная схема включения в трехфазную сеть асинхронного двигателя с фазным ротором показана на рис. 2.5, б. Обмотка ротора этого двигателя соединена с пусковым реостатом ПР, создающим в цепи ротора добавочное сопротивление $R_{доб}$.

На корпусе асинхронного двигателя прикреплена металлическая табличка, на которой указаны тип двигателя, завод-изготовитель, год выпуска и номинальные данные (полезная мощность, напряжение, ток, коэффициент мощности, частота вращения и КПД).

2.2. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И КПД АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Преобразование электрической энергии в механическую в асинхронном двигателе, как и в других электрических машинах, связано с потерями энергии, поэтому полезная мощность на выходе двигателя P_2 всегда меньше мощности на входе (потребляемой мощности) P_1 на величину потерь $\sum P$:

$$P_2 = P_1 - \sum P. \quad (2.4)$$

Потери $\sum P$ преобразуются в теплоту, что в конечном итоге ведет к нагреву двигателя. Потери в электрических машинах подразделяют на основные и добавочные. Основные потери включают в себя магнитные, электрические и механические.

Магнитные потери P_m в асинхронном двигателе вызваны потерями на гистерезис и потерями на вихревые токи, происходящими в сердечнике при его перемагничивании. Величина магнитных потерь зависит от частоты перемагничивания $P_m \equiv f^V$, где $V = 1,3 \dots 1,5$. Частота перемагничивания сердечника статора равна частоте тока в сети ($f = f_1$), а частота перемагничивания сердечника ротора $f_2 = f_1 s$. При частоте тока в сети $f_1 = 50$ Гц и номинальном скольжении $s_{ном} = 1 \dots 8$ % частота перемагничивания ротора $f_2 = 0,5 \dots 4,0$ Гц, поэтому магнитные потери в сердечнике ротора настолько малы, что в практических расчетах их можно не учитывать.

Электрические потери в асинхронном двигателе вызваны нагревом обмоток статора и ротора проходящими по ним токами. Величина этих потерь пропорциональна квадрату тока в обмотке, Вт: электрические потери в обмотке статора

$$P_{\sigma 1} = m_1 I_1^2 r_1; \quad (2.5)$$

электрические потери в обмотке ротора

$$P_{\sigma 2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2^2 r_2'. \quad (2.6)$$

Здесь r_1 и r_2 — активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора, пересчитанные на рабочую температуру $\theta_{раб}$:

$$r_1 = r_{1,20} [1 + \alpha(\theta_{раб} - 20)]; \quad (2.7a)$$

$$r_2 = r_{2,20} [1 + \alpha(\theta_{раб} - 20)], \quad (2.7б)$$

где $r_{1,20}$ и $r_{2,20}$ — активные сопротивления обмоток при температуре $\theta_1 = 20$ °С; α — температурный коэффициент сопротивления, для меди $\alpha = 0,004$.

В соответствии с действующим стандартом рабочая температура принимается в зависимости от класса нагревостойкости электрической изоляции, используемой в двигателе: при классе нагревостойкости В она равна 75 °С, а при классах F и H — 115 °С.

Электрические потери в роторе прямо пропорциональны скольжению:

$$P_{\sigma 2} = s P_{эм}, \quad (2.8)$$

где $P_{эм}$ — электромагнитная мощность асинхронного двигателя, Вт:

$$P_{эм} = P_1 - (P_m + P_{э1}). \quad (2.9)$$

Из (2.8) следует, что работа асинхронного двигателя экономичнее при малых скольжениях, так как с ростом скольжения увеличиваются электрические потери в роторе.

В асинхронных двигателях с фазным ротором помимо перечисленных электрических потерь имеют место еще и электрические потери в щеточном контакте

$$P_{э,щ} = 3I_2\Delta U_{щ}/2,$$

где $U_{щ} = 2,2 \text{ В}$ — переходное падение напряжения на пару щеток.

Механические потери $P_{мех}$ — это потери на трение в подшипниках и на вентиляцию. Величина этих потерь пропорциональна квадрату частоты вращения ротора ($P_{мех} \equiv n_2^2$). В асинхронных двигателях с фазным ротором механические потери происходят еще и за счет трения между щетками и контактными кольцами ротора.

Добавочные потери включают в себя все виды трудно учитываемых потерь, вызванных действием высших гармоник МДС, пульсацией магнитной индукции в зубцах и другими причинами. В соответствии со стандартом добавочные потери асинхронных двигателей принимают равными 0,5 % подводимой к двигателю мощности P_1 :

$$P_{доб} = 0,005P_1. \quad (2.10)$$

При расчете добавочных потерь для ненулевого режима следует пользоваться выражением

$$P'_{доб} = P_{доб}\beta^2, \quad (2.11)$$

где $\beta = I_1/I_{1ном}$ — коэффициент нагрузки.

Сумма всех потерь асинхронного двигателя, Вт:

$$\sum P = P_m + P_{э1} + P_{э2} + P_{мех} + P_{доб}. \quad (2.12)$$

На рис. 2.8 показана энергетическая диаграмма асинхронного двигателя, из которой видно, что часть подводимой к двигателю мощности $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \phi_1$ затрачивается в статоре на магнитные P_m и электрические $P_{э1}$ потери. Оставшаяся после этого электромагнитная мощность $P_{эм}$ [см. (2.9)] передается на ротор, где частично расходуется на электрические потери в обмотке ротора $P_{э2}$ и преобразуется в полную механическую мощность P'_2 . Часть мощности идет на покрытие механических $P_{мех}$ и добавочных потерь $P_{доб}$, а оставшаяся часть этой мощности P_2 составляет полезную мощность двигателя.

КПД асинхронного двигателя

$$\eta = P_2/P_1 = 1 - \sum P/P_1. \quad (2.13)$$

Электрические потери в обмотках статора $P_{\text{э}1}$ и ротора $P_{\text{э}2}$ являются переменными потерями, так как их величина зависит от нагрузки двигателя, т. е. от значений токов в обмотках статора и ротора. Переменными являются также и добавочные потери. Что же касается магнитных $P_{\text{м}}$ и механических $P_{\text{мех}}$ потерь, то они практически не зависят от нагрузки (исключение составляют двигатели, у которых с изменением нагрузки в широком диапазоне меняется частота вращения).

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя с изменениями нагрузки также меняет свою величину:

в режиме холостого хода КПД равен нулю, а затем с ростом нагрузки он увеличивается, достигая максимума при нагрузке $(0,7 \dots 0,8)P_{\text{ном}}$. При дальнейшем возрастании нагрузки КПД незначительно снижается, а при перегрузке двигателя ($P_2 > P_{\text{ном}}$) он резко убывает, что объясняется интенсивным ростом переменных потерь ($P_{\text{э}1} + P_{\text{э}2} + P_{\text{доб}}$), величина которых пропорциональна квадрату тока в обмотке статора, и уменьшением коэффициента мощности. График зависимости КПД от нагрузки $\eta = f(P_2)$ для асинхронных двигателей имеет вид, аналогичный показанному на рис. 1.10.

КПД трехфазных асинхронных двигателей общего назначения при номинальной нагрузке составляет: для двигателей мощностью от 1 до 20 кВт $\eta_{\text{ном}} = 75 \dots 90 \%$, для двигателей мощностью более 20 кВт $\eta_{\text{ном}} = 90 \dots 95 \%$.

Пример 2.2. Трехфазный асинхронный двигатель работает от сети напряжением 660 В при соединении обмоток статора звездой. При номинальной нагрузке он потребляет из сети мощность $P_1 = 16,7$ кВт при коэффициенте мощности $\cos \varphi_1 = 0,87$. Частота вращения $n_{\text{ном}} = 1470$ мин⁻¹. Требуется определить КПД двигателя при номинальной нагрузке $\eta_{\text{ном}}$, если магнитные потери $P_{\text{м}} = 265$ Вт, а механические потери $P_{\text{мех}} = 123$ Вт. Активное сопротивление фазы обмотки статора $r_{1,20} = 0,8$ Ом, а рабочая температура $\theta_{\text{раб}} = 115$ °С.

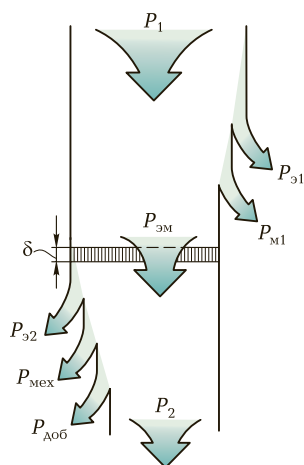


Рис. 2.8. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Решение. Ток в фазе обмотки статора

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_1 10^3}{m_1 U_1 \cos \varphi_1} = \frac{16,7 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,87} = 16,8 \text{ А,}$$

где напряжение фазное $U_1 = 660/\sqrt{3} = 380 \text{ В}$.

Сопротивление фазы обмотки статора, пересчитанное на рабочую температуру $\theta_{\text{раб}} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$, по (2.7):

$$r_1 = r_{1,20}[1 + \alpha(\theta_{\text{раб}} - 20)] = 0,8[1 + 0,004(115 - 20)] = 1,1 \text{ Ом.}$$

Электрические потери в обмотке статора по (2.5):

$$P_{\text{э1}} = m_1 I_{\text{ном}}^2 r_1 = 3 \cdot 16,8^2 \cdot 1,1 = 931 \text{ Вт.}$$

Электромагнитная мощность двигателя по (2.9):

$$P_{\text{эм}} = P_1 - (P_{\text{м}} + P_{\text{э1}}) = 16,7 \cdot 10^3 - (265 + 931) = 15\,504 \text{ Вт.}$$

Номинальное скольжение

$$s_{\text{ном}} = (n_1 - n_{\text{ном}})/n_1 = (1\,500 - 1\,470)/1\,500 = 0,020.$$

Электрические потери в обмотке ротора по (2.8):

$$P_2 = s_{\text{ном}} P_{\text{эм}} = 0,020 \cdot 15\,504 = 310 \text{ Вт.}$$

Добавочные потери по (2.10)

$$P_{\text{доб}} = 0,005 P_1 = 0,005 \cdot 16,7 \cdot 10^3 = 83 \text{ Вт.}$$

Суммарные потери по (2.12):

$$\sum P = P_{\text{м}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}} = 265 + 931 + 310 + 123 + 83 = 1\,712 \text{ Вт.}$$

КПД двигателя в номинальном режиме по (2.13):

$$\eta_{\text{ном}} = 1 - \sum P/P_1 = 1 - 1\,712/(16,7 \cdot 10^3) = 0,898 \text{ или } 89,8 \text{ \%}.$$

Коэффициент полезного действия является одним из основных параметров асинхронного двигателя, определяющим его энергетические свойства — экономичность в процессе эксплуатации. Кроме того, КПД двигателя, а точнее величина потерь в нем, определяет температуру нагрева его основных частей и в первую очередь его обмотки статора. По этой причине двигатели одинаковой мощности с низким КПД (при одинаковых условиях охлаждения) работают при более высокой температуре нагрева обмотки статора, что ведет к снижению их надежности и долговечности за счет более интенсивного старения изоляции обмоток.

2.3. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рабочие характеристики асинхронного двигателя (рис. 2.9) представляют собой графически выраженные зависимости частоты вращения n_2 , КПД η , полезного момента (момента на валу) M_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и тока статора I_1 от полезной мощности P_2 при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$.

Скоростная характеристика $n_2 = f(P_2)$. Частота вращения ротора асинхронного двигателя

$$n_2 = n_1(1 - s).$$

Скольжение по (2.8):

$$s = P_{32}/P_{3M} \quad (2.14)$$

т. е. скольжение двигателя, а следовательно, и его частота вращения определяются отношением электрических потерь в роторе к электромагнитной мощности P_{3M} . Пренебрегая электрическими потерями в роторе в режиме холостого хода, ввиду их небольшой величины, можно принять $P_{32} = 0$, поэтому скольжение в режиме холостого хода $s_0 \approx 0$ и $n_{20} \approx n_1$. По мере увеличения нагрузки на валу двигателя отношение (2.14) растет, достигая значений 0,01 ... 0,08 при номинальной нагрузке. В соответствии с этим зависимость $n_2 = f(P_2)$ представляет собой кривую, слабо наклоненную к оси абсцисс. Однако при повышении активного сопротивления ротора r_2' угол наклона этой кривой увеличивается. В этом случае изменения частоты вращения n_2 при колебаниях нагрузки

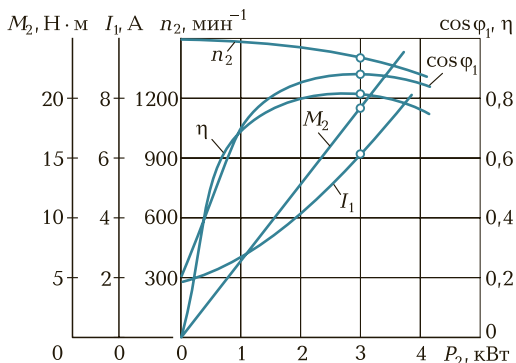


Рис. 2.9. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

P_2 возрастают. Объясняется это тем, что с увеличением r_2' возрастают электрические потери в роторе.

Зависимость $M_2 = f(P_2)$. Зависимость полезного момента на валу двигателя M_2 от полезной мощности P_2 определяется выражением

$$M_2 = P_2 / \omega_2 = 60P_2 / (2\pi n_2) = 9,55P_2 / n_2, \quad (2.15)$$

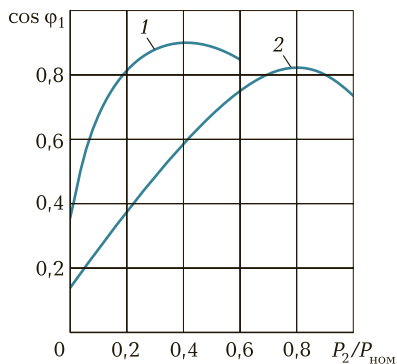
где P_2 — полезная мощность, Вт; $\omega_2 = 2\pi n_2 / 60$ — угловая скорость вращения ротора.

Из этого выражения следует, что если $n_2 = \text{const}$, то график $M_2 = f_2(P_2)$ представляет собой прямую линию. Но в асинхронном двигателе с увеличением нагрузки P_2 частота вращения ротора уменьшается, поэтому полезный момент на валу M_2 с увеличением нагрузки возрастает несколько быстрее P_2 , следовательно, график $M_2 = f(P_2)$ имеет криволинейный вид.

Зависимость $\cos \varphi_1 = f(P_2)$. В связи с тем что ток статора I_1 имеет реактивную (индуктивную) составляющую, необходимую для создания магнитных полей в двигателе, коэффициент мощности асинхронных двигателей меньше единицы. Наименьшее значение коэффициента мощности соответствует режиму холостого хода. Объясняется это тем, что ток холостого хода I_0 при любой нагрузке остается практически неизменным. Поэтому при малых нагрузках двигателя ток статора невелик и в значительной части является реактивным ($I_1 \approx I_0$). В результате сдвиг по фазе тока статора \dot{I}_1 относительно напряжения \dot{U}_1 получается значительным ($\varphi_1 \approx \varphi_0$), лишь немногим меньше 90° . Коэффициент мощности асинхронных двигателей в режиме холостого хода обычно не превышает 0,2. При увеличении нагрузки на валу двигателя растет активная составляющая тока I_1 и коэффициент мощности возрастает, достигая наибольшего значения (0,80...0,90) при нагрузке, близкой к номинальной. Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается уменьшением $\cos \varphi_1$, что объясняется возрастанием индуктивного сопротивления ротора (x_2s) за счет увеличения скольжения, и следовательно, увеличения угла фазового сдвига в цепи ротора $\psi_2 = \text{arctg}(x_2s/r_2)$ и частоты тока в роторе.

В целях повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей чрезвычайно важно, чтобы двигатель работал всегда или по крайней мере значительную часть времени с нагрузкой, близкой к номинальной. Это можно обеспечить лишь при правильном выборе мощности двигателя. Если же двигатель работает значительную часть времени недогруженным, то для повышения $\cos \varphi_1$ целесообразно подводимое к двигателю напряжение U_1

Рис. 2.10. Зависимость $\cos \varphi_1$ от нагрузки при соединении обмотки статора звездой (1) и треугольником (2)



уменьшить. Например, в двигателях, работающих при соединении обмотки статора треугольником, это можно сделать пересоединив обмотки статора в звезду, что вызовет уменьшение фазного напряжения в $\sqrt{3}$ раз. При этом магнитный поток статора, а следовательно, и намагничивающий ток уменьшаются примерно в $\sqrt{3}$ раз. Кроме того, активная составляющая тока статора несколько увеличивается. Все это способствует повышению коэффициента мощности двигателя.

На рис. 2.10 показаны графики зависимости $\cos \varphi_1$ асинхронного двигателя от нагрузки при соединении обмоток статора звездой (график 1) и треугольником (график 2).

Другие рабочие характеристики асинхронного двигателя, важные для работы электропривода, рассмотрены в гл. 8.

2.4. ОДНОФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

По своему устройству однофазный асинхронный двигатель аналогичен трехфазному и состоит из статора, в пазах которого уложена однофазная обмотка, и короткозамкнутого ротора. Особенность работы однофазного асинхронного двигателя заключается в том, что при включении однофазной обмотки статора С1—С2 в сеть (рис. 2.11) ток статора создает не вращающийся, а пульсирующий магнитный поток, неподвижный в пространстве.

На рис. 2.12 показан график зависимости вращающего момента M в функции скольжения s , из которого видно, что пусковой момент однофазного двигателя ($s = 1$) равен нулю. Следовательно, однофазный асинхронный двигатель не может самостоятельно прийти во вращение при подключении его к сети, а нуждается

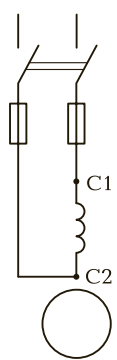


Рис. 2.11. Схема включения однофазного асинхронного двигателя

в первоначальном толчке, так как лишь при $s \neq 1$ на ротор двигателя действует вращающий момент.

Приведенная на рис. 2.12 зависимость момента показывают, что однофазный асинхронный двигатель не создает пускового момента. Чтобы этот момент появился, необходимо во время пуска двигателя создать в нем *вращающееся* магнитное поле. С этой целью на статоре двигателя помимо *рабочей* обмотки *A* применяют еще одну обмотку — *пусковую B*. Эти обмотки располагают на статоре обычно так, чтобы их оси были смещены относительно друг друга на 90° . Кроме того, токи в обмотках статора I_A и I_B должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга. Для этого в цепь пусковой обмотки включают *фазосмещающий элемент* (ФЭ), в качестве которого могут быть применены активное сопротивление, индуктивность или емкость (рис. 2.13). По достижении частотой вращения значения, близкого к номинальному, пусковую обмотку *B* отключают с помощью реле. Таким образом, во время пуска двигатель является двухфазным, а во время работы — однофазным.

Получили распространение однофазные двигатели с активным сопротивлением в качестве ФЭ. При этом повышенное активное сопротивление пусковой обмотки достигается тем, что она выполняется проводом уменьшенного сечения (по сравнению с прово-

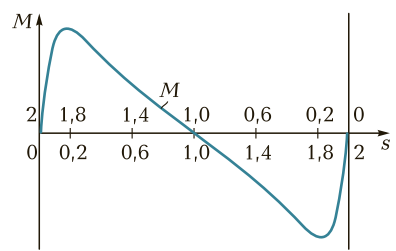


Рис. 2.12. Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя

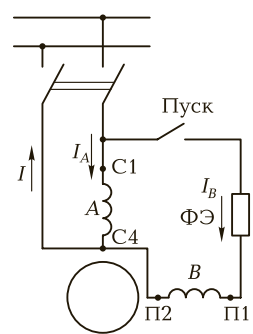


Рис. 2.13. Схема однофазного асинхронного двигателя с пусковой обмоткой

дом рабочей обмотки). Так как эта обмотка включена на непродолжительное время (обычно несколько секунд), то такая ее конструкция вполне допустима. Пусковой момент этих двигателей обычно не превышает номинального, но это вполне приемлемо при пуске двигателей при небольшой нагрузке на валу. Применение емкости в качестве ФЭ позволяет получить пусковой момент $M_{п} = (1,6 \dots 2,0)M_{ном}$.

Асинхронный конденсаторный двигатель. Имеет на статоре две обмотки, занимающие одинаковое число пазов и сдвинутые в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град. Одну из обмоток — *главную* — включают непосредственно в однофазную сеть, а другую — *вспомогательную* — включают в ту же сеть, но через рабочий конденсатор $C_{раб}$ (рис. 2.14, а).

В отличие от рассмотренного ранее однофазного асинхронного двигателя в конденсаторном двигателе вспомогательная обмотка после пуска не отключается и остается включенной в течение всего периода работы, при этом емкость $C_{раб}$ создает фазовый сдвиг между токами и I_A и I_B .

Таким образом, если однофазный асинхронный двигатель по окончании процесса пуска работает с пульсирующим магнитным полем статора, то конденсаторный двигатель — с вращающимся магнитным полем. Поэтому конденсаторные двигатели по своим свойствам приближаются к трехфазным двигателям.

Необходимая для получения кругового вращающегося поля емкость, мкФ:

$$C_{раб} = 1,6 \cdot 10^5 I_A \sin \varphi_B / (f_1 U_A k^2), \quad (2.16)$$

при этом отношение напряжений на главной U_A и на вспомогательной U_B обмотках должно быть

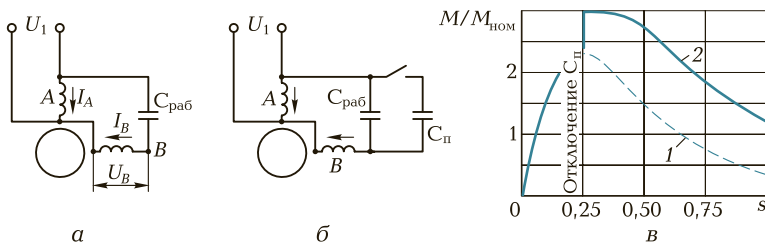


Рис. 2.14. Конденсаторный двигатель:

а — с рабочей емкостью; б — с рабочей и пусковой емкостями; в — механические характеристики: 1 — при рабочей емкости; 2 — при рабочей и пусковой емкостях

$$U_A/U_B = \operatorname{tg} \varphi_A \neq 1,$$

где φ_A — угол сдвига фаз между током \dot{I}_A и напряжением \dot{U}_A при круговом поле; $k = \omega_B k_B / (\omega_A k_A)$ — коэффициент трансформации, представляющий собой отношение эффективных чисел витков вспомогательной и главной обмоток; k_A и k_B — обмоточные коэффициенты обмоток статора.

Анализ (2.16) показывает, что при заданных коэффициенте трансформации k и отношении напряжений U_A/U_B емкость $C_{\text{раб}}$ обеспечивает получение кругового вращающегося поля лишь при одном, вполне определенном режиме работы двигателя. Если же изменится режим (нагрузка), то изменятся и ток I_A и фазовый угол φ_A , а следовательно, и емкость $C_{\text{раб}}$, соответствующая круговому полю. Таким образом, если нагрузка двигателя отличается от расчетной, то вращающееся поле двигателя становится эллиптическим и рабочие свойства двигателя ухудшаются. Обычно расчет емкости $C_{\text{раб}}$ ведут для номинальной нагрузки или близкой к ней.

Обладая сравнительно высокими КПД и коэффициентом мощности ($\cos \varphi_1 = 0,80 \dots 0,95$), конденсаторные двигатели имеют неудовлетворительные пусковые свойства, так как емкость $C_{\text{раб}}$ обеспечивает круговое поле лишь при расчетной нагрузке, а при пуске двигателя поле статора эллиптическое. При этом пусковой момент обычно не превышает $0,5M_{\text{ном}}$.

Для повышения пускового момента параллельно емкости $C_{\text{раб}}$ включают емкость $C_{\text{п}}$, называемую *пусковой* (рис. 2.14, б). Величину $C_{\text{п}}$ выбирают исходя из условия получения кругового поля статора при пуске двигателя, т. е. получения наибольшего пускового момента. По окончании пуска емкость $C_{\text{п}}$ следует отключить, так как при небольших скольжениях в цепи обмотки статора, содержащей емкость и индуктивность, возможен *резонанс напряжений*, из-за чего напряжение на обмотке и на конденсаторе может в два-три раза превысить напряжение сети.

При выборе типа конденсатора следует помнить, что его рабочее напряжение определяется амплитудным значением синусоидального напряжения, приложенного к конденсатору U_C . При круговом вращающемся поле это напряжение (U) превышает напряжение сети U_1 и определяется выражением

$$U_C = U_1 \sqrt{1 + k^2}. \quad (2.17)$$

Управляемые электродвигатели. В системах управления, регулирования и контроля широко применяют управляемые электро-

двигатели небольшой мощности. С помощью этих двигателей осуществляется преобразование электрического сигнала в механическое перемещение — вращение вала. Такие электродвигатели называют исполнительными (ИД).

Характер требований, предъявляемых к исполнительным двигателям, определяется спецификой их работы: частые пуски, реверсы, постоянно изменяющаяся частота вращения. Основные требования — отсутствие *самохода* при снятии сигнала управления; широкий диапазон регулирования частоты вращения; линейность характеристик; большой пусковой момент; малая мощность управления; быстродействие (малоинерционность).

На статоре асинхронного исполнительного двигателя расположены две однофазные обмотки. Одна из обмоток — обмотка возбуждения (ОВ) — постоянно включена в сеть с напряжением U_1 , а на другую — обмотку управления (ОУ) — напряжение (сигнал управления) U_y подается лишь при необходимости пуска двигателя (рис. 2.15).

Для работы двухфазного ИД необходимо вращающееся магнитное поле, неизменным условием возникновения которого является наличие пространственного и временного сдвигов между магнитно-движущей силой (МДС) фазных обмоток статора. Пространственный сдвиг указанных МДС обеспечивается конструкцией статора, при которой оси фазных обмоток сдвинуты в пространстве относительно друг друга обычно на угол 90 эл.град. Временной (фазный) сдвиг МДС создается либо питанием обмотки статора двухфазной системой напряжений, либо включением в цепь ОУ фазовращателя — устройства, позволяющего получать различные фазовые сдвиги напряжения на его выходе относительно напряжения на входе, т. е. относительно напряжения на обмотке возбужде-

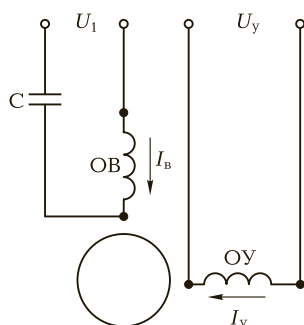


Рис. 2.15. Схема включения асинхронного исполнительного двигателя

ния. Однако чаще всего этот временной (фазовый) сдвиг получают включением последовательно в цепь ОВ емкости C .

Обычно значение емкости C выбирают из условия получения кругового поля при пуске двигателя. По окончании пускового периода двигатель работает с эллиптическим вращающимся полем.

Управление исполнительным двигателем осуществляют путем изменения величины (амплитуды) или фазового сдвига управляющего сигнала U_y на обмотке управления ОУ, при этом меняются как значение (амплитуда) МДС этой обмотки, так и ее фазовый сдвиг относительно МДС обмотки возбуждения ОВ. Поэтому рассматриваемый способ управления ИД называют *амплитудно-фазовым*.

К исполнительным двигателям предъявляется требование *малоинерционности* (быстродействия), т. е. при подаче сигнала управления ротор двигателя должен очень быстро достигать установившейся частоты вращения. Выполнению этого требования способствуют увеличение пускового момента, уменьшение синхронной частоты вращения поля статора и снижение момента инерции ротора. При повышенных частотах питающего напряжения (больших синхронных частотах вращения) ИД с ротором обычной (короткозамкнутой) конструкции из-за значительного момента инерции последнего не обладают требуемым быстродействием. В этом случае применяют асинхронные исполнительные

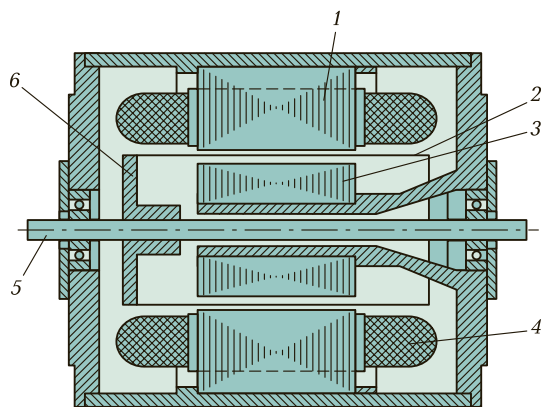


Рис. 2.16. Асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором:

1 — внешний статор; 2 — стакан ротора; 3 — внутренний статор; 4 — обмотка статора; 5 — вал; 6 — втулка крепления полого ротора

двигатели с полым немагнитным ротором (рис. 2.16). Полый немагнитный ротор представляет собой тонкостенный алюминиевый стакан 2, что, с одной стороны, обеспечивает ротору повышенное активное сопротивление, а с другой — весьма небольшой момент инерции.

Двигатель имеет два статора: внешний 1 с обмоткой и внутренний 3 без обмотки, входящий внутрь полого стакана ротора. Внутренний статор необходим для уменьшения магнитного сопротивления основному магнитному потоку.

По сравнению с исполнительными двигателями обычной конструкции двигателя с полым немагнитным ротором имеют повышенные габариты и невысокий КПД. Это объясняется значительным зазором между наружным и внутренним статорами, который складывается из толщины стенки стакана ротора и двух воздушных зазоров. Как известно, увеличение воздушного зазора способствует росту намагничивающего тока двигателя и снижению КПД.

2.5. ЛИНЕЙНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Подвижная часть линейного двигателя совершает поступательное движение, поэтому применение этих двигателей для привода рабочих машин с поступательным движением рабочего органа позволяет упростить кинематику механизмов, уменьшить потери в передачах и повысить надежность механизма в целом. Возможны линейные двигатели четырех видов: электромагнитные (соленоидные), магнитоэлектрические (с применением постоянного магнита), электродинамические и асинхронные. Асинхронные (индукционные) линейные двигатели благодаря простоте конструкции и высокой надежности получили наибольшее применение.

Для объяснения принципа работы линейного асинхронного двигателя обратимся к асинхронному двигателю с вращательным движением ротора. Если статор этого двигателя (рис. 2.17, а) мысленно «разрезать» и «развернуть» так, чтобы он образовал дугу с углом α (рис. 2.17, б), то диаметр ротора увеличится. При этом получим асинхронный двигатель с *дуговым* статором.

Частота вращения, мин^{-1} , магнитного поля статора этого двигателя (синхронная частота)

$$n_1 = n_1^0 \alpha / (2\pi), \quad (2.18)$$

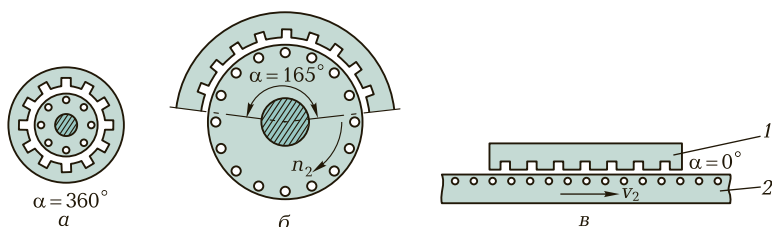


Рис. 2.17. К понятиям о дуговом и линейном двигателях:

1 — индуктор; 2 — вторичный элемент

где n_1^0 — синхронная частота вращения обычного (до «разрезания», т. е. $\alpha = 360^\circ$) асинхронного двигателя, мин^{-1} ; α — угол дуги статора, рад.

Из (2.18) следует, что, изменяя угол α , можно получить дуговой асинхронный двигатель на любую синхронную частоту меньше частоты вращения n_1^0 . Например, дуговой асинхронный двигатель при $\alpha = 165^\circ$ имеет синхронную частоту вращения:

$$n_1^{165} = n_1^0(165/360) = 0,458n_1^0.$$

Дуговые двигатели применяют для безредукторного привода устройств, требующих небольших частот вращения, исключив применение сложного и трудоемкого редуктора. Если «разрезанный» статор развернуть в плоскость, то получим *асинхронный линейный двигатель* (рис. 2.17, в). Принципиальное конструктивное отличие линейного асинхронного двигателя от асинхронного двигателя с вращательным движением ротора состоит в том, что первичный элемент линейного двигателя (индуктор) создает не вращающееся, а бегущее магнитное поле и подвижная часть двигателя с короткозамкнутой обмоткой (или без нее), называемая *вторичным элементом*, перемещается вдоль своей оси. Скорость бегущего поля в линейном двигателе, м/с:

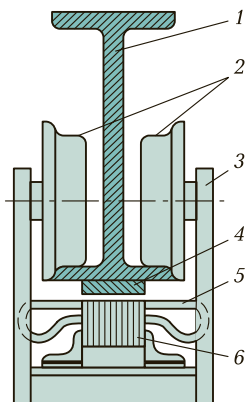
$$v = 2\tau f_1 = f_1 L_c / p, \quad (2.19)$$

где τ — полюсное деление, м; f_1 — частота тока в обмотке статора, Гц; L_c — длина статора (индуктора), м.

Принцип действия линейного асинхронного двигателя основан на том, что бегущее поле индуктора, сцепляясь с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента двигателя, наводит в ней ЭДС. Возникающие в стержнях вторичной обмотки токи взаимодействуют с бегущим полем индуктора и создают на индукторе и вторичном элементе электромагнитные силы, направленные проти-

Рис. 2.18. Линейный асинхронный двигатель привода тележки подъемного крана:

1 — балка; 2 — направляющая для колес; 3 — тележка; 4 — стальная полоса; 5 — обмотка; 6 — сердечник



воположно друг другу и стремящиеся линейно переместить подвижную часть двигателя относительно неподвижной. В некоторых конструкциях линейных двигателей подвижной частью является индуктор, в других — вторичный элемент, называемый в этом случае *бегунком*. Если вторичный элемент линейного двигателя невозможно изготовить с короткозамкнутой обмоткой, то применяют вторичные элементы в виде полосы из меди, алюминия или ферромагнитной стали. Удовлетворительными получаются характеристики линейного двигателя при *составном* вторичном элементе, выполненном в виде полосы из ферромагнитной стали, покрытой слоем меди.

Линейные асинхронные двигатели применяют для привода заслонок, ленточных конвейеров, подъемно-транспортных механизмов. На рис. 2.18 показано устройство линейного асинхронного двигателя привода тележки подъемного крана. На тележке 3 расположен индуктор линейного двигателя, состоящий из шихтованного сердечника 6, в пазах которого расположена обмотка 5. Направляющая для колес 2 представляет собой стальную балку 1, к нижней части которой прикреплена стальная полоса 4. Бегущее магнитное поле индуктора наводит в стальной полосе вихревые токи. Электромагнитные силы, возникающие в результате взаи-

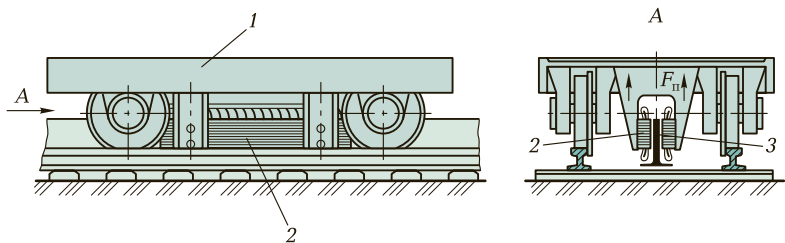


Рис. 2.19. Линейный асинхронный двигатель привода железнодорожного транспортного средства:

1 — транспортное средство; 2 — индуктор; 3 — стальная полоса

модействия этих токов с магнитным полем индуктора, перемещают индуктор (тележку) вдоль стальной полосы 4.

Линейные асинхронные двигатели значительной мощности применяют на транспорте в качестве тяговых двигателей. Один из вариантов такого двигателя показан на рис. 2.19. Здесь индуктор 2 двигателя подвешен к транспортному средству 1, а стальная полоса 3 установлена вертикально на основании пути между рельсами. В этой конструкции поперечная сила $F_{\text{пр}}$, вызванная краевым эффектом, используется полезно, так как она снижает силу давления на несущие оси и колеса и, как следствие, уменьшает трение качения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое скольжение асинхронной машины?
2. Каков диапазон изменения скольжения асинхронной машины в различных режимах ее работы?
3. Объясните конструкцию короткозамкнутого и фазного роторов.
4. Трехфазный асинхронный двигатель предназначен для работы при напряжениях сети 220/380 В. Как следует соединить обмотку статора этого двигателя при напряжениях сети 220 и 380 В?
5. Какие виды потерь имеют место в асинхронном двигателе?
6. Почему магнитные потери в сердечнике ротора не учитывают?
7. На какие виды потерь влияют величина воздушного зазора и толщина пластин сердечника статора?
8. Используя данные примера 2.1 и задавшись значениями тока статора $I_1 = 0,5, 0,75, 1,15 I_{1\text{ном}}$, определите соответствующие значения КПД и постройте график $\eta = f(P_2)$; при расчетах примите следующие значения коэффициента мощности: $\cos \varphi_{1,0,5} = 0,4$; $\cos \varphi_{1,0,75} = 0,6$; $\cos \varphi_{1,1,15} = 0,8$.
9. Почему график $I_1 = f(P_2)$ не выходит из начала координат?
10. Почему при нагрузках двигателя меньше номинальной его $\cos \varphi_1$ имеет низкие значения?
11. Почему однофазный двигатель не создает пускового момента?
12. С какой целью в цепь пусковой обмотки двигателя включают ФЭ?
13. Чем отличается однофазный двигатель от конденсаторного?
14. Как можно повысить пусковой момент в конденсаторном двигателе?
15. Какие особенности имеет асинхронный исполнительный двигатель?
16. Приведите примеры использования асинхронных двигателей.

СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

3.1. УСТРОЙСТВО И СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

Синхронные машины — это бесколлекторные машины переменного тока. По своему устройству они отличаются от асинхронных машин лишь конструкцией ротора, который может быть явнополюсным или неявнополюсным. Что же касается свойств, то основными из них являются вращение ротора с синхронной частотой при любой нагрузке, а также возможность регулирования коэффициента мощности, устанавливая такое его значение, при котором работа синхронной машины становится наиболее экономичной. Синхронные машины обратимы и могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Синхронные генераторы составляют основу электроэнергетического оборудования электростанций, т. е. практически вся электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами. Единичная мощность современных синхронных генераторов достигает 1 млн кВт и более. Синхронные двигатели применяют главным образом для привода устройств большой мощности. Они по своим технико-экономическим показателям превосходят двигатели других типов.

В крупных электроэнергетических установках синхронные машины могут использоваться в качестве компенсаторов — генераторов реактивной мощности. Применение компенсаторов дает возможность повысить коэффициент мощности установки или крупного энергетического узла, что способствует энергосбережению.

Синхронная машина состоит из неподвижной части — статора и вращающейся части — ротора. Статоры синхронных машин в принципе не отличаются от статоров асинхронных двигателей (см. гл. 2), т. е. состоят из корпуса, сердечника и обмотки.

Конструктивное исполнение статора синхронной машины может быть различным в зависимости от назначения и габаритов ма-

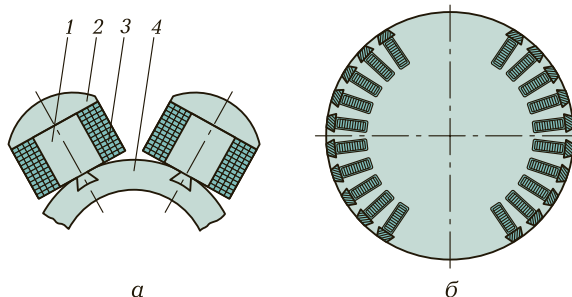


Рис. 3.1. Конструкция роторов синхронных машин:
 а — с явно выраженными полюсами; б — с неявно выраженными полюсами

шины. Так, в многополюсных машинах большой мощности при наружном диаметре сердечника статора более 900 мм пластины сердечника делают из отдельных сегментов, которые при сборке образуют цилиндр сердечника статора. Корпуса статоров крупногабаритных машин делают разъемными, что необходимо для удобства транспортировки и монтажа этих машин.

Роторы синхронных машин могут иметь две принципиально различающиеся конструкции: явнополюсную и неявнополюсную (рис. 3.1).

В энергетических установках по производству электроэнергии переменного тока в качестве первичных (приводных) двигателей синхронных генераторов применяют в основном три вида двигателей: паровые турбины, гидравлические турбины либо двигатели внутреннего сгорания (дизели). Применение любого из перечисленных двигателей принципиально влияет на конструкцию синхронного генератора.

Если приводным двигателем является *гидравлическая турбина*, то синхронный генератор называют *гидрогенератором*. Гидравлическая турбина обычно развивает небольшую частоту вращения (60 ... 500 мин⁻¹), поэтому для получения переменного тока промышленной частоты (50 Гц) в гидрогенераторе применяют ротор с большим числом полюсов. Роторы гидрогенераторов имеют *явнополюсную конструкцию*, т. е. с явно выраженными полюсами, при которой каждый полюс выполняют в виде отдельного узла, состоящего из сердечника 1, полюсного наконечника 2 и полюсной катушки 3 (рис. 3.1, а). Все полюсы ротора закреплены на обode 4, являющемся также и ярмом магнитной системы машины, в котором замыкаются потоки полюсов. Гидрогенераторы обычно изготавливают с вертикальным расположением вала (рис. 3.2).

Паровая турбина работает при большой частоте вращения, поэтому приводимый ею во вращение генератор, называемый турбогенератором, является быстроходной синхронной машиной. Роторы этих генераторов выполняют либо двухполюсными ($n_1 = 3000 \text{ мин}^{-1}$), либо четырехполюсными ($n_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$).

В процессе работы турбогенератора на его ротор действуют значительные центробежные силы. Поэтому по условиям механической прочности в турбогенераторах применяют неявнополюсный ротор, имеющий вид удлинненного стального цилиндра с профрезерованными на поверхности продольными пазами для обмотки возбуждения (рис. 3.1, б). Сердечник неявнополюсного ротора изготавливают в виде цельной стальной поковки вместе с хвостовиками (концами вала) или же сборным. Обмотка возбуждения неявнополюсного ротора занимает лишь $\frac{2}{3}$ его поверхности (по периметру). Оставшаяся $\frac{1}{3}$ поверхности образует полюсы. Для защиты лобовых частей обмотки ротора от разрушения действием

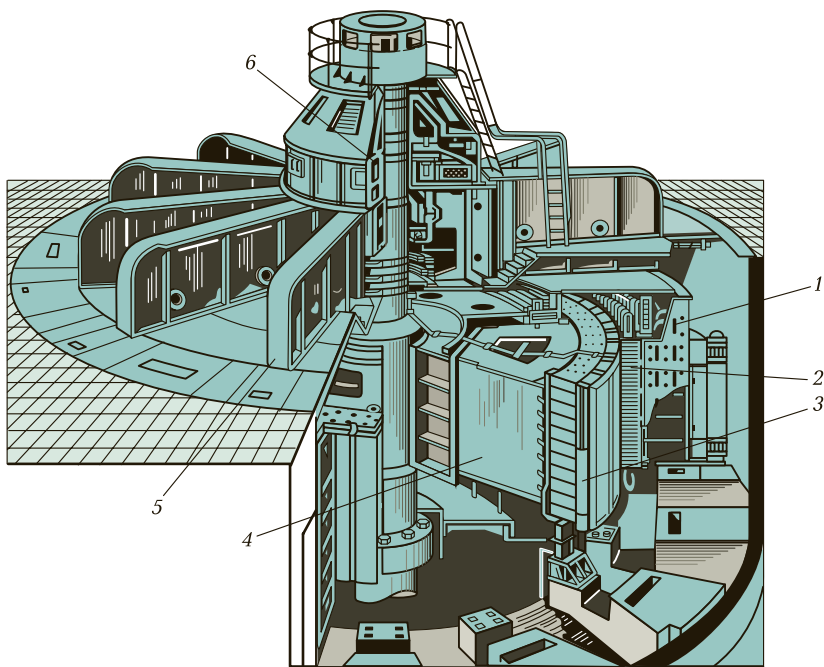


Рис. 3.2. Гидрогенератор (225 МВт; 15,8 кВ; 125 мин^{-1}):

1 — корпус статора; 2 — сердечник статора; 3 — полюс ротора; 4 — обод ротора; 5 — грузонесущая крестовина; 6 — подпятник

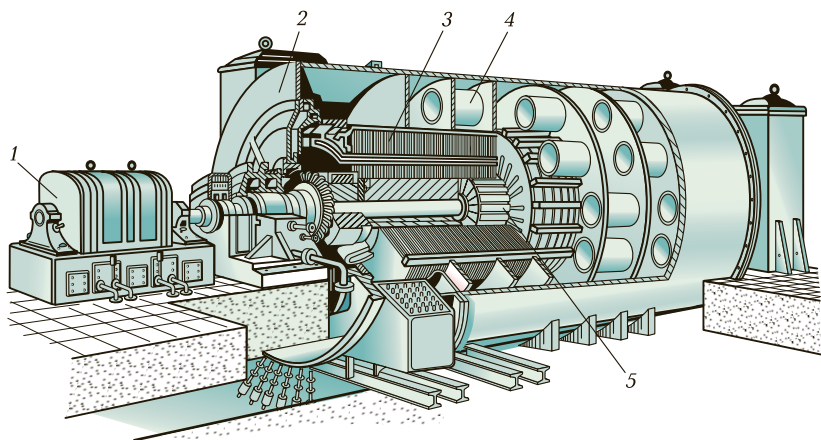


Рис. 3.3. Турбогенератор:

1 — возбудитель; 2 — корпус; 3 — сердечник статора; 4 — секции водородного охлаждения; 5 — ротор

центробежных сил ротор с двух сторон прикрывают стальными бандажными кольцами (каппами), изготавливаемыми обычно из немагнитной стали.

Турбогенераторы (рис. 3.3) и дизель-генераторы изготавливают с горизонтальным расположением вала. Дизель-генераторы рассчитывают на частоту вращения $600 \dots 1500 \text{ мин}^{-1}$ и выполняют с явнополюсным ротором (рис. 3.4).

Большую группу синхронных машин составляют *синхронные двигатели*, которые обычно изготавливаются мощностью до нескольких тысяч киловатт и предназначаются для привода мощных вентиляторов, мельниц, насосов и других устройств, не требующих регулирования частоты вращения. Рассмотрим устройство синхронного двигателя серии СДН2 (рис. 3.5). Двигатели этой серии изготавливаются мощностью от 315 до 4000 кВт при частотах вращения от 300 до 1000 мин^{-1} и предназначаются для включения в сеть частотой 50 Гц при напряжении 0,38 или 6 кВ.

Сердечник статора 4, запрессованный в стальной корпус, состоит из пакетов-сегментов, собранных из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Для лучшего охлаждения двигателя пакеты разделены радиальными вентиляционными каналами шириной по 10 мм. Обмотка статора 12 двухслойная с укороченным шагом. Сердечники полюсов 11 ротора крепятся к остоу 3 шпильками 5. Обмотка ротора состоит из полюсных ка-

тушек. Контактные кольца 8 крепятся на конце вала. На роторе имеются лопатки 6 центробежного вентилятора. Стояковые подшипники скольжения 2 и 7 установлены на подшипниковых полуцилиндрах 1 и 9. Двигатель с торцовых сторон прикрыт стальными щитами 13. В обшивке 10 корпуса имеются вентиляционные окна, прикрытые жалюзи. На боковой поверхности корпуса расположена коробка выводов 14. Возбуждение двигателей осуществляется от тиристорных преобразователей с автоматическим регулированием тока возбуждения при пуске и остановке двигателей.

Любая синхронная машина нуждается в процессе возбуждения — наведения в ней магнитного поля.

Основным способом возбуждения синхронных машин является **электромагнитное возбуждение**, состоящее в том, что на полюсах ротора располагают обмотку возбуждения. При прохожде-

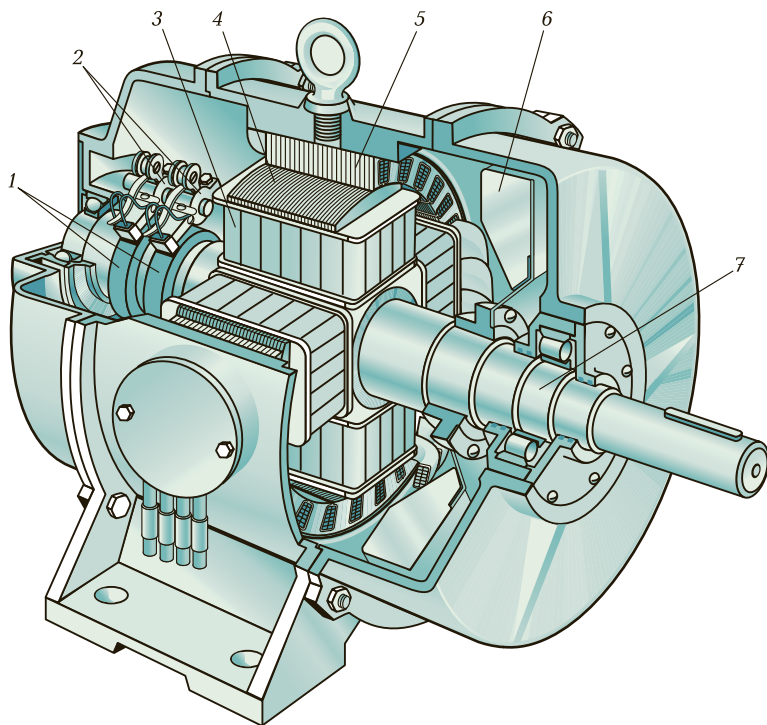


Рис. 3.4. Дизель-генератор:

1 — контактные кольца; 2 — щеткодержатели; 3 — полюсная катушка; 4 — полюсный наконечник; 5 — сердечник статора; 6 — вентилятор; 7 — вал

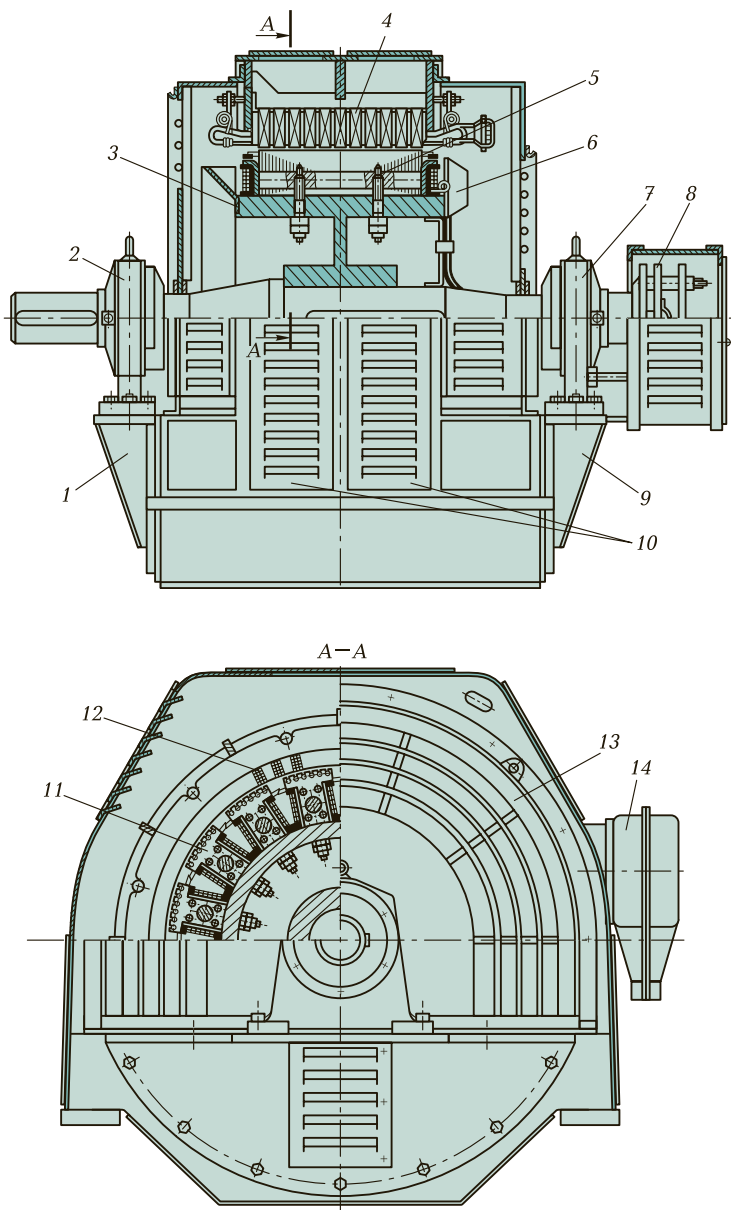


Рис. 3.5. Устройство синхронного двигателя серии СДН2:

1, 9 и 13 — стальные щиты; 2 и 7 — подшипники скольжения; 3 — осто; 4 — сердечник статора; 5 — шпильки; 6 — лопатки; 8 — контактные кольца; 10 — обшивка корпуса; 11 — сердечники полюсов; 12 — обмотка статора; 14 — коробка выводов

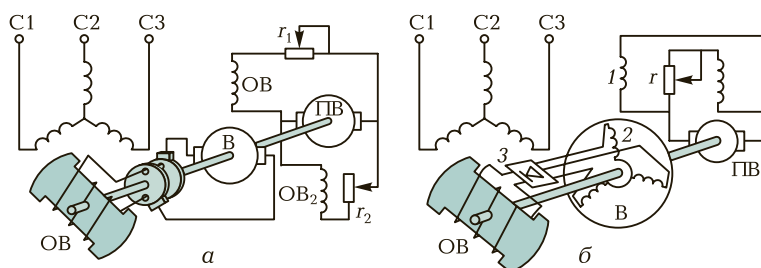


Рис. 3.6. Контактная (а) и бесконтактная (б) системы электромагнитного возбуждения синхронных генераторов

нии по этой обмотке постоянного тока в магнитной системе машины создается магнитное поле.

До последнего времени для питания обмотки возбуждения преимущественно применялись специальные генераторы постоянного тока независимого возбуждения, называемые возбудителями В (рис. 3.6, а). Обмотка возбуждения (ОВ) возбудителя получает питание от другого генератора (параллельного возбуждения), называемого подвозбудителем (ПВ). Ротор синхронной машины и якоря возбудителя и подвозбудителя располагаются на общем валу и вращаются одновременно. При этом ток в обмотку возбуждения синхронной машины поступает через контактные кольца и щетки. Для регулирования тока возбуждения применяют регулировочные реостаты, включаемые в цепи возбуждения возбудителя (r_1) и подвозбудителя (r_2).

В синхронных генераторах средней и большой мощности процесс регулирования тока возбуждения автоматизируют. В синхронных генераторах большой мощности — турбогенераторах — иногда в качестве возбудителя применяют генераторы переменного тока индукторного типа. На выходе такого генератора включают полупроводниковый выпрямитель. Регулировка тока возбуждения синхронного генератора в этом случае осуществляется изменением возбуждения индукторного генератора.

Получила применение в синхронных генераторах *бесконтактная система электромагнитного возбуждения*, при которой синхронный генератор не имеет контактных колец на роторе. В качестве возбудителя и в этом случае применяют генератор переменного тока (рис. 3.6, б). Обмотка 2 этого генератора, в которой наводится ЭДС (обмотка якоря), расположена на роторе, а обмотка возбуждения 1 — на статоре. В результате обмотка якоря возбудителя и обмотка возбуждения синхронной машины оказываются

вращающимися и их электрическое соединение осуществляется непосредственно, без контактных колец и щеток. Но так как возбудитель является генератором переменного тока, а обмотку возбуждения необходимо питать постоянным током, на выходе обмотки якоря возбудителя включают полупроводниковый преобразователь Z , закрепленный на валу синхронной машины и вращающийся вместе с обмоткой возбуждения синхронной машины и обмоткой якоря возбудителя. Питание постоянным током обмотки возбуждения I возбудителя осуществляется от подвозбудителя (ПВ) — генератора постоянного тока. Отсутствие скользящих контактов в цепи возбуждения синхронной машины позволяет повысить ее эксплуатационную надежность и увеличить КПД.

В синхронных генераторах, в том числе гидрогенераторах, получил распространение принцип *самовозбуждения* (рис. 3.7, а), когда энергия переменного тока, необходимая для возбуждения, отбирается от обмотки статора синхронного генератора и через понижающий трансформатор и выпрямительный полупроводниковый преобразователь (ПП) преобразуется в энергию постоянного тока. Принцип самовозбуждения основан на том, что первоначальное возбуждение генератора происходит за счет остаточного магнетизма магнитопровода машины.

На рис. 3.7, б показана структурная схема *автоматической системы самовозбуждения* синхронного генератора (СГ) с выпрямительным трансформатором (ВТ) и тиристорным преобразователем (ТП), через которые электроэнергия переменного тока из цепи статора СГ после преобразования в постоянный ток подается в обмотку возбуждения. Управление тиристорным преобразователем осуществляется посредством автоматического регулятора возбуждения АРВ, на вход которого поступают сигналы напряжения на вы-

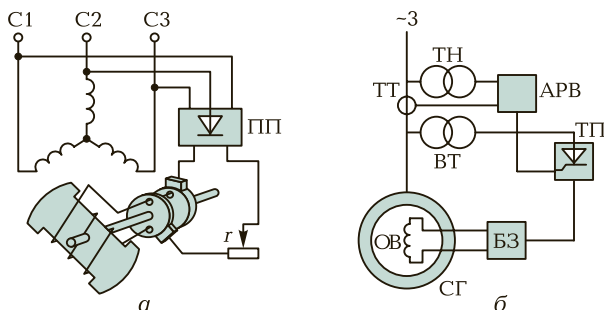


Рис. 3.7. Принцип самовозбуждения синхронных генераторов (а и б)

ходе СГ (через трансформатор напряжения ТН) и тока нагрузки СГ (от трансформатора тока ТТ). Схема содержит блок защиты БЗ, обеспечивающий защиту обмотки возбуждения и тиристорного преобразователя ТП от перенапряжений и токовой перегрузки.

В современных синхронных двигателях для возбуждения применяют *тиристорные возбуждающие устройства*, включаемые в сеть переменного тока и осуществляющие автоматическое управление током возбуждения во всевозможных режимах работы двигателя, в том числе и переходных. Такой способ возбуждения является наиболее надежным и экономичным, так как КПД тиристорных возбуждающих устройств выше, чем у генераторов постоянного тока. Промышленностью выпускаются тиристорные возбуждающие устройства на различные напряжения возбуждения с допустимым значением постоянного тока 320 А.

Наибольшее распространение в современных сериях синхронных двигателей получили возбуждающие тиристорные устройства типов ТЕ8-320/48 (напряжение возбуждения 48 В) и ТЕ8-320/75 (напряжение возбуждения 75 В).

Мощность, затрачиваемая на возбуждение, обычно составляет от 0,2 до 5 % полезной мощности машины (меньшее значение относится к машинам большой мощности). В синхронных машинах малой мощности находит применение принцип *возбуждения постоянными магнитами*, когда на роторе машины располагаются постоянные магниты. Такой способ возбуждения дает возможность избавить машину от обмотки возбуждения. В результате конструкция машины упрощается, становится более экономичной и надежной. Однако из-за дефицитности материалов для изготовления постоянных магнитов с большим запасом магнитной энергии и сложности их обработки применение возбуждения постоянными магнитами ограничивается машинами мощностью не более нескольких киловатт.

В крупных электрических машинах применяют замкнутую систему охлаждения с использованием водорода в качестве охлаждающего газа. Особые свойства водорода обеспечивают водородному охлаждению ряд преимуществ.

1. Технический водород более чем в 10 раз легче воздуха, что способствует снижению потерь на вентиляцию, а следовательно, повышает КПД машины. Например, в турбогенераторе мощностью 150 тыс. кВт потери на вентиляцию при воздушном охлаждении составляют 1 000 кВт, а при водородном охлаждении турбогенератора такой же мощности эти потери составляют всего лишь 140 кВт.

2. Благодаря повышенной теплопроводности водорода, которая в 6—7 раз больше, чем у воздуха, он интенсивнее охлаждает машину. Это дает возможность при заданных габаритах изготовить машину с водородным охлаждением мощностью на 20...25 % больше, чем при воздушном охлаждении.

3. Водородное охлаждение снижает опасность возникновения пожара в машине, потому что водород не поддерживает горения.

4. Водородное охлаждение увеличивает срок службы изоляции обмоток, так как при явлении короны благодаря отсутствию азота в машине не образуются нитраты — соединения, разъедающие органические составляющие изоляционных материалов.

Эффективность водородного охлаждения повышается с ростом давления водорода в машине. Но наряду с перечисленными достоинствами водородное охлаждение имеет и недостатки, сущность которых состоит в том, что водородное охлаждение ведет к усложнению и удорожанию как самой машины, так и ее эксплуатации. Объясняется это, в первую очередь, необходимостью содержания целого комплекса устройств водородного хозяйства, обеспечивающего подпитку, очистку и поддержание требуемого давления водорода в системе охлаждения машины. Однако в машинах большой единичной мощности (турбогенераторах, гидрогенераторах, синхронных компенсаторах) водородное охлаждение оправдано и дает большой экономический эффект.

Рассмотренные способы охлаждения машин являются косвенными, так как происходят без непосредственного контакта охлаждающего вещества с наиболее нагретыми элементами машины — обмотками. Отбор теплоты от обмоток при этих способах охлаждения происходит через электрическую изоляцию (в лобовых частях) и сталь магнитопровода, что снижает эффективность процесса охлаждения. Поэтому более эффективным является непосредственное охлаждение обмоток и других нагреваемых элементов машины. Для осуществления этого способа охлаждения в проводниках обмотки и сердечниках делают внутренние каналы, по которым циркулирует охлаждающее вещество — водород, вода, масло.

Непосредственный контакт охлаждающего вещества с проводниками обмоток и внутренними слоями магнитопроводов повышает интенсивность теплоотвода и позволяет существенно увеличить удельные электромагнитные нагрузки машины (плотность тока и максимальное значение магнитной индукции). Обычно непосредственное охлаждение применяют в электрических машинах весьма большой мощности — турбо- и гидрогенераторах, что позволяет значительно увеличить единичную мощность этих машин.

3.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Для изучения принципа действия синхронного генератора воспользуемся упрощенной моделью синхронной машины (рис. 3.8). Неподвижная часть машины, называемая *статором*, представляет собой полый шихтованный цилиндр 1 (сердечник статора) с двумя продольными пазами на внутренней поверхности. В этих пазах расположены стороны витка 2, являющегося *обмоткой статора*. Во внутренней полости сердечника статора расположена вращающаяся часть машины — *ротор*, представляющий собой постоянный магнит 4 с полюсами N и S, закрепленный на валу 3. Вал ротора посредством ременной передачи механически связан с приводным двигателем (на рисунке не показан). В реальном синхронном генераторе в качестве приводного двигателя может быть использован двигатель внутреннего сгорания либо турбина. Под действием вращающего момента приводного двигателя ротор генератора вращается с частотой n_1 против часовой стрелки. При этом в обмотке статора в соответствии с явлением электромагнитной индукции наводится ЭДС, направление которой показано на рисунке стрелками. Так как обмотка статора замкнута на нагрузку $Z_{нп}$, то в цепи этой обмотки появится ток i .

В процессе вращения ротора магнитное поле постоянного магнита также вращается с частотой n_1 , а поэтому каждый из проводников обмотки статора попеременно оказывается то в зоне северного (N) магнитного полюса, то в зоне южного (S) магнитного полюса. При этом каждая смена полюсов сопровождается изменением направления ЭДС в обмотке статора. Таким образом, в обмотке статора синхронного генератора наводится *переменная*

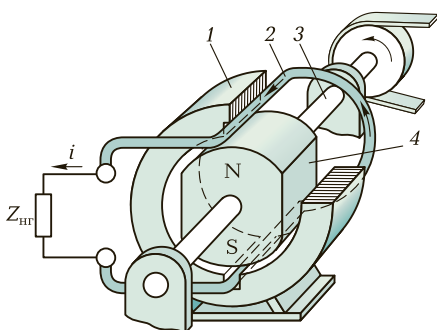


Рис. 3.8. Упрощенная модель синхронного генератора:

1 — цилиндр; 2 — обмотка статора; 3 — вал; 4 — магнит

ЭДС, а поэтому ток i в этой обмотке и в нагрузке $Z_{\text{нп}}$ также переменный.

Мгновенное значение ЭДС обмотки статора в рассматриваемом синхронном генераторе (B)

$$e = B_{\delta} 2lv = B_{\delta} 2l\pi D_1 n_1 / 60, \quad (3.1)$$

где B_{δ} — магнитная индукция в воздушном зазоре между сердечником статора и полюсами ротора, Тл; l — активная длина одной пазовой стороны обмотки статора, м; $v = \pi D_1 n_1 / 60$ — скорость движения полюсов ротора относительно статора, м/с; D_1 — внутренний диаметр сердечника статора, м.

Эта формула показывает, что при неизменной частоте вращения ротора форма кривой переменной ЭДС обмотки якоря определяется исключительно законом распределения магнитной индукции B_{δ} в зазоре. Если бы график магнитной индукции в зазоре представлял собой *синусоиду* ($B_{\delta} = B_{\text{max}} \sin \alpha$), то ЭДС генератора была бы *синусоидальной*. Однако получить синусоидальное распределение индукции в зазоре практически невозможно. Так, если воздушный зазор δ постоянен (рис. 3.9), то магнитная индукция B_{δ} в воздушном зазоре распределяется по трапецеидальному закону (график 1), а следовательно, и график ЭДС генератора представляет собой трапецию. Если края полюсов скосить так, чтобы зазор на краях полюсных наконечников был равен δ_{max} (как это показано на рис. 3.9), то график распределения магнитной индукции в зазоре приблизится к синусоиде (график 2), а следовательно, и график ЭДС, наведенной в обмотке генератора, приблизится к синусоиде.

Частота ЭДС синхронного генератора f_1 , Гц, прямо пропорциональна частоте вращения ротора n_1 , мин⁻¹, которую принято называть *синхронной частотой вращения*:

$$f_1 = pn_1 / 60, \quad (3.2)$$

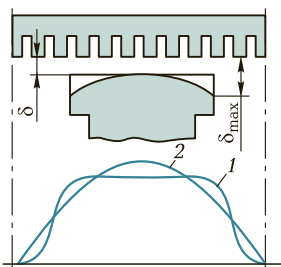


Рис. 3.9. Характеристики (1 и 2) распределения магнитной индукции в воздушном зазоре синхронного генератора

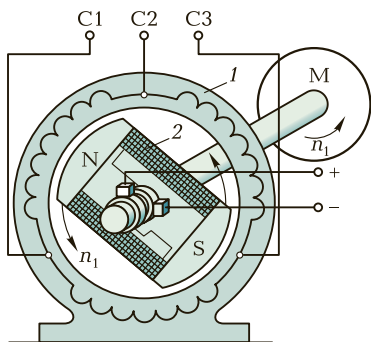


Рис. 3.10. Электромагнитная схема синхронного генератора:

1 — статор; 2 — ротор

где p — число пар полюсов; в рассматриваемом генераторе два полюса, т. е. $p = 1$.

Для получения промышленной частоты ЭДС (50 Гц) ротор такого генератора необходимо вращать с частотой $n_1 = 3000 \text{ мин}^{-1}$, тогда

$$f_1 = 1 \cdot 3000 / 60 = 50 \text{ Гц.}$$

Постоянные магниты на роторе используют лишь в синхронных генераторах малой мощности, поэтому в большинстве синхронных генераторов для получения возбуждающего магнитного поля применяют *обмотку возбуждения*, располагаемую на роторе. Эта обмотка подключается к источнику постоянного тока через скользящие контакты, осуществляемые посредством двух контактных колец, располагаемых на валу и изолированных от вала и друг от друга, и двух неподвижных щеток (рис. 3.10).

Как уже отмечалось, приводной двигатель (М) приводит во вращение ротор синхронного генератора с синхронной частотой n_1 . При этом магнитное поле ротора также вращается с частотой n_1 и индуцирует в трехфазной обмотке статора переменные ЭДС E_A , E_B , E_C , которые, будучи одинаковыми по значению и сдвинутыми по фазе относительно друг друга на $1/3$ периода (120 эл. град.), образуют трехфазную симметричную систему ЭДС.

С подключением нагрузки в фазах обмотки статора появляются токи I_A , I_B , I_C . При этом трехфазная обмотка статора создает вращающееся магнитное поле. Частота вращения этого поля равна частоте вращения ротора генератора, что и определяет название синхронных электрических машин.

3.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Свойства синхронного генератора определяются характеристиками холостого хода, короткого замыкания, внешними и регулировочными.

Характеристика холостого хода синхронного генератора. Представляет собой график зависимости напряжения на выходе генератора в режиме холостого хода $U_1 = E_0$ от тока возбуждения I_{B0} при $n_1 = \text{const}$. Схема включения синхронного генератора для снятия характеристики холостого хода показана на рис. 3.11, а. Если характеристики холостого хода различных синхронных генераторов изобразить в относительных единицах $E_* = f(I_{B*})$, то эти характеристики мало отличаются друг от друга и будут очень схожи с *нормальной характеристикой* холостого хода (рис. 3.11, б), которую используют при расчетах синхронных машин:

E_*	0,58	1,0	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51
I_{B*}	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

Здесь $E_* = E_0/U_{1\text{ном}}$ — относительная ЭДС фазы обмотки статора; $I_{B*} = I_{B0}/I_{B0\text{ном}}$ — относительный ток возбуждения; $I_{B0\text{ном}}$ — ток возбуждения в режиме холостого хода, соответствующий ЭДС холостого хода $E_0 = U_{1\text{ном}}$.

Характеристика трехфазного короткого замыкания. Может быть получена следующим образом: выводы обмотки статора замыкают накоротко (рис. 3.12, а) и при вращении ротора с частотой вращения n_1 постепенно увеличивают ток возбуждения до значения, при котором ток короткого замыкания превышает номиналь-

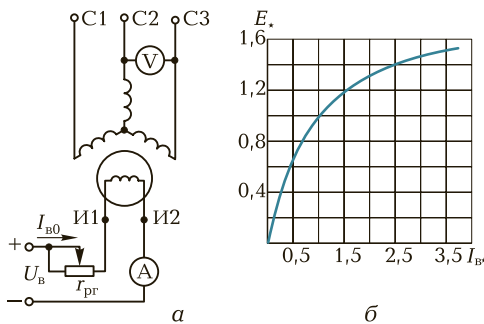


Рис. 3.11. Опыт холостого хода синхронного генератора (а) и его характеристика (б)

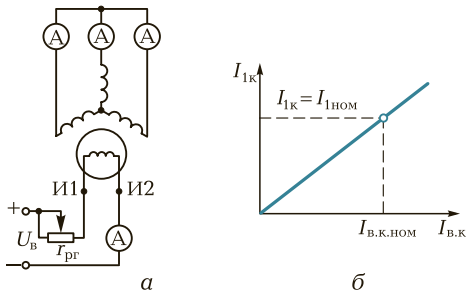


Рис. 3.12. Опыт короткого замыкания синхронного генератора (а) и его характеристика (б)

ный рабочий ток статорной обмотки не более чем на 25% ($I_{1к} = 1,25I_{1ном}$). Так как в этом случае ЭДС обмотки статора имеет значение, в несколько раз меньшее, чем в рабочем режиме генератора, и, следовательно, основной магнитный поток весьма мал, то магнитная цепь машины оказывается ненасыщенной. По этой причине характеристика короткого замыкания представляет собой прямую линию (рис. 3.12, б).

Внешняя характеристика. Представляет собой зависимость напряжения на выводах обмотки статора от тока нагрузки: $U_1 = f(I_1)$ при $I_B = \text{const}$; $\cos \varphi_1 = \text{const}$; $n_1 = n_{ном} = \text{const}$.

На рис. 3.13, а показаны внешние характеристики синхронного генератора, соответствующие различным по характеру нагрузкам.

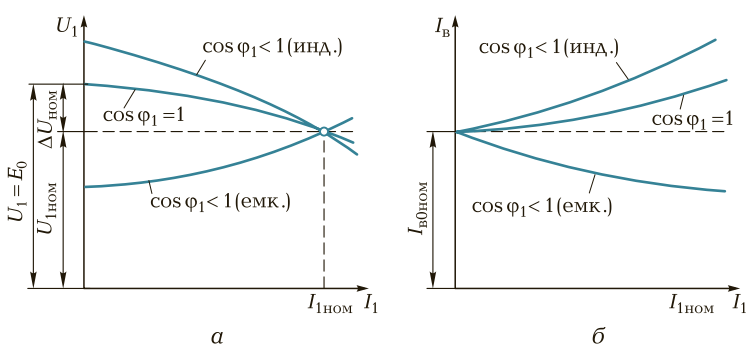


Рис. 3.13. Внешние (а) и регулировочные (б) характеристики синхронного генератора

При активной нагрузке ($\cos \varphi_1 = 1$) уменьшение тока нагрузки I_1 сопровождается ростом напряжения U_1 , что объясняется уменьшением падения напряжения в обмотке статора.

При индуктивной нагрузке ($\cos \varphi_1 < 1$; инд.) увеличение U_1 при сбросе нагрузки более интенсивно, так как с уменьшением тока I_1 ослабляется размагничивающее действие продольной составляющей реакции якоря.

При емкостной нагрузке генератора ($\cos \varphi_1 < 1$; емк.) уменьшение I_1 сопровождается понижением напряжения U_1 .

Изменение напряжения синхронного генератора, вызванное сбросом номинальной нагрузки при $I_b = \text{const}$ и $n_1 = \text{const}$, называется *номинальным изменением (повышением) напряжения, %*:

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{E_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}}. \quad (3.3)$$

При емкостной нагрузке генератора сброс нагрузки вызывает уменьшение напряжения на выходе генератора, а поэтому $\Delta U_{\text{ном}}$ принимают со знаком «минус». В процессе эксплуатации синхронного генератора напряжение U_1 при колебаниях нагрузки поддерживается неизменным посредством быстродействующих автоматических регуляторов тока в обмотке возбуждения. Однако для нормальной эксплуатации синхронного генератора $\Delta U_{\text{ном}}$ не должно превышать 50 %.

Регулировочная характеристика. Показывает, как следует изменять ток возбуждения генератора при изменениях нагрузки, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось неизменно равным номинальному: $I_b = f(I_1)$ при $U_1 = U_{\text{ном}} = \text{const}$; $n_1 = n_{\text{ном}} = \text{const}$ и $\cos \varphi_1 = \text{const}$.

На рис. 3.13, б показаны регулировочные характеристики синхронного генератора. При активной нагрузке ($\cos \varphi_1 = 1$) увеличение тока нагрузки I_1 сопровождается уменьшением напряжения U_1 . Для поддержания этого напряжения неизменным по мере увеличения тока нагрузки I_1 следует повышать ток возбуждения. Увеличение нагрузки индуктивного характера ($\cos \varphi_1 < 1$; инд.) вызывает более резкое понижение напряжения U_1 (рис. 3.13, а), поэтому ток возбуждения I_b , необходимый для поддержания $U_1 = U_{\text{ном}}$, следует повышать в большей степени. При емкостном же характере нагрузки ($\cos \varphi_1 < 1$; емк.) увеличение нагрузки сопровождается ростом напряжения U_1 , поэтому для поддержания $U_1 = U_{\text{ном}}$ ток возбуждения следует уменьшать.

Угловые характеристики синхронного генератора. Электромагнитная мощность неявнополюсного синхронного генератора при его параллельной работе с сетью

$$P_{\text{эм.н}} = (m_1 U_1 E_0 \sin \theta) / x_c, \quad (3.4)$$

где θ — угол, на который продольная ось ротора смещена относительно продольной оси результирующего поля машины.

Электромагнитная мощность явнополюсного синхронного генератора

$$P_{\text{эм.я}} = \frac{m_1 U_1 E_0}{x_d} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (3.5)$$

где $x_d = x_{ad} + x_1$ и $x_q = x_{aq} + x_1$ — синхронные индуктивные сопротивления явнополюсной синхронной машины по продольной и поперечной осям соответственно, Ом.

Разделив выражения (3.4) и (3.5) на синхронную угловую скорость вращения ω_1 , получим выражения электромагнитных моментов синхронных машин:

неявнополюсной

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega_1} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_c} \sin \theta; \quad (3.6)$$

явнополюсной

$$M_{\text{я}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega_1} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (3.7)$$

где M — электромагнитный момент, Н·м.

Анализ выражения (3.7) показывает, что электромагнитный момент явнополюсной синхронной машины имеет две составляющие: одна из них представляет собой *основную составляющую электромагнитного момента*

$$M_{\text{осн}} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta, \quad (3.8)$$

а другая — *реактивную составляющую момента*

$$M_{\text{р}} = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (3.9)$$

Основная составляющая электромагнитного момента $M_{\text{осн}}$ явнополюсной синхронной машины зависит не только от напряже-

ния сети ($M_{\text{осн}} \equiv U$), но и от ЭДС E_0 , наведенной магнитным потоком вращающегося ротора Φ в обмотке статора:

$$E_0 = 4,44f_1\Phi w_1k_{\text{об1}}. \quad (3.10)$$

Это свидетельствует о том, что основная составляющая электромагнитного момента $M_{\text{осн}}$ зависит от магнитного потока ротора: $M_{\text{осн}} \equiv \Phi$. Отсюда следует, что в машине с невозбужденным ротором ($\Phi = 0$) основная составляющая момента $M_{\text{осн}} = 0$.

При увеличении нагрузки синхронного генератора, т. е. с ростом тока I_1 , происходит увеличение угла нагрузки θ , что ведет к изменению электромагнитной мощности генератора и его электромагнитного момента. Зависимости $P_{\text{эм}} = f(\theta)$ и $M = f(\theta)$, представленные графически, называются *угловыми характеристиками синхронной машины*.

Рассмотрим угловые характеристики электромагнитной мощности $P_{\text{эм,я}} = f(\theta)$ и электромагнитного момента $M = f(\theta)$ явнополюсного синхронного генератора (рис. 3.14). Эти характеристики построены при условии постоянства напряжения сети ($U_c = \text{const}$) и магнитного потока возбуждения, т. е. $E_0 = \text{const}$. Из выражений (3.5) и (3.8) видим, что основная составляющая электромагнитного момента $M_{\text{осн}}$ и соответствующая ей составляющая электромагнитной мощности изменяются пропорционально синусу угла θ (кривая 1), а реактивная составляющая момента (3.9) и соответствующая ей составляющая электромагнитной мощности изменяются пропорционально синусу угла 2θ (кривая 2). Зависимость результирующего момента $M_{\text{я}} = M_{\text{осн}} + M_{\text{р}}$ и электромагнитной мощности $P_{\text{эм}}$ от угла θ определяется характеристикой 3, полученным сложением значений моментов $M_{\text{осн}}$ и $M_{\text{р}}$ или соответствующих им значений мощности по ординатам.

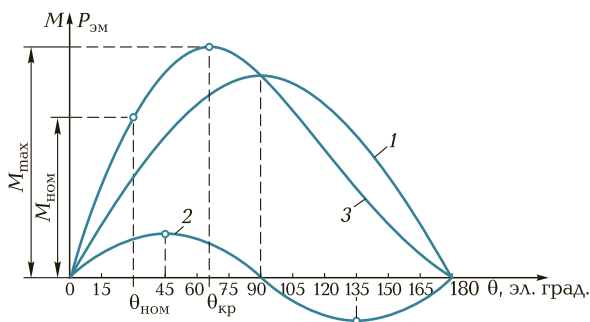


Рис. 3.14. Угловые характеристики (1...3) синхронного генератора

Максимальное значение электромагнитного момента M_{\max} соответствует критическому значению угла нагрузки $\theta_{\text{кр}}$.

Как видно из результирующей угловой характеристики $M_{\text{я}} = f(\theta)$ (кривая 3), при увеличении нагрузки до значений, соответствующих углу $\theta \leq \theta_{\text{кр}}$, синхронная машина работает устойчиво. Объясняется это тем, что при $\theta \leq \theta_{\text{кр}}$ рост нагрузки генератора (увеличение θ) сопровождается повышением электромагнитного момента. В этом случае любой установившейся нагрузке соответствует равенство вращающего момента приводного двигателя M_1 сумме противодействующих моментов, т. е. $M_1 = M_{\text{я}} + M_0$. В результате частота вращения ротора остается неизменной, равной синхронной частоте вращения.

При нагрузке, соответствующей углу $\theta > \theta_{\text{кр}}$, электромагнитный момент $M_{\text{я}}$ уменьшается, что ведет к нарушению равенства вращающего и противодействующих моментов. При этом избыточная (неуравновешенная) часть вращающего момента первичного двигателя $\Delta M = M_1 - (M_{\text{я}} + M_0)$ вызывает увеличение частоты вращения ротора, что ведет к нарушению условий синхронизации (машина выходит из синхронизма).

Электромагнитный момент, соответствующий критическому значению угла нагрузки ($\theta_{\text{кр}}$), является максимальным M_{\max} . Для явнополюсных синхронных машин $\theta_{\text{кр}} = 60 \dots 80$ эл. град. Угол нагрузки $\theta_{\text{кр}}$ можно определить по формуле

$$\cos \theta_{\text{кр}} = \sqrt{\beta^2 + 0,5 - \beta}, \quad (3.11)$$

где

$$\beta = E_0 / [4U_1(x_d/x_q - 1)]. \quad (3.12)$$

У неявнополюсных синхронных машин $M_p = 0$, а поэтому угловая характеристика представляет собой синусоиду и угол $\theta_{\text{кр}} = 90^\circ$.

Отношение максимального электромагнитного момента M_{\max} к номинальному $M_{\text{ном}}$ называют *перегрузочной способностью синхронной машины* или *коэффициентом статической перегрузаемости*:

$$\lambda = M_{\max} / M_{\text{ном}} = 1,4 \dots 3,0. \quad (3.13)$$

Пренебрегая реактивной составляющей момента, можно записать

$$\lambda = 1 / \sin \theta_{\text{ном}}, \quad (3.14)$$

т. е. чем меньше угол $\theta_{\text{ном}}$, соответствующий номинальной нагрузке синхронной машины, тем больше ее перегрузочная способ-

ность. Например, у турбогенератора $\theta_{\text{ном}} = 25 \dots 30^\circ$, что соответствует $\lambda = 2,35 \dots 2,0$.

U-образные характеристики. Если при всех изменениях тока возбуждения вращающий момент приводного двигателя остается неизменным, то также неизменной остается активная мощность генератора:

$$P_2 = m_1 U_c I_1 \cos \varphi_1 = \text{const.}$$

Из этого выражения следует, что при $U_c = \text{const}$ активная составляющая тока статора $I_q = I_1 \cos \varphi_1 = \text{const}$.

Таким образом, *степень возбуждения синхронного генератора влияет только на реактивную составляющую тока статора*. Что же касается активной составляющей тока $I_q = I_1 \cos \varphi_1$, то она остается неизменной.

Зависимость тока статора I_1 от тока в обмотке возбуждения I_b при неизменной активной нагрузке генератора выражается графически U-образной характеристикой. На рис. 3.15 показаны U-образные характеристики $I_1 = f(I_b)$ при $P_2 = \text{const}$, построенные для разных значений активной нагрузки: $P_2 = 0$; $P_2 = 0,5P_{\text{ном}}$ и $P_2 = P_{\text{ном}}$. U-образные характеристики синхронного генератора показывают, что любой нагрузке генератора соответствует такое значение тока возбуждения I'_b , при котором ток статора I_1 становится минимальным и равным только своей активной составляющей:

$$I_{1\text{мин}} = I_1 \cos \varphi_1 = I_q.$$

В этом случае генератор работает при коэффициенте мощности $\cos \varphi_1 = 1$. Значения тока возбуждения, соответствующие $\cos \varphi_1 = 1$ при различной нагрузке генератора, показаны на рис. 3.15 пунк-

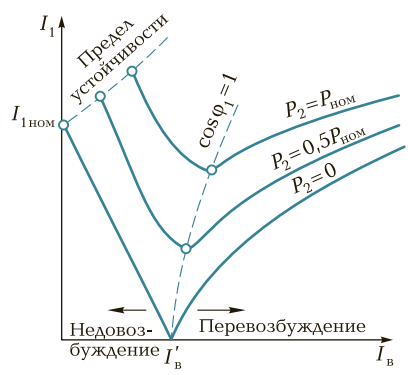


Рис. 3.15. U-образные характеристики синхронного генератора

тирной кривой. Некоторое отклонение этой кривой вправо указывает на то, что при увеличении нагрузки ток возбуждения, соответствующий $\cos \varphi_1 = 1$, несколько возрастает. Объясняется это тем, что при росте нагрузки необходимо некоторое увеличение тока возбуждения, компенсирующее активное падение напряжения в обмотке статора синхронного генератора.

Необходимо иметь в виду, что при постепенном уменьшении тока возбуждения наступает такое минимальное его значение, при котором магнитный поток обмотки возбуждения оказывается настолько ослабленным, что синхронный генератор выпадает из синхронизма — нарушается магнитная связь между возбужденными полюсами ротора и вращающимся полем статора. Если соединить все точки минимально допустимых значений тока возбуждения на U-образных характеристиках (штриховая линия в левой части рис. 3.15), то получим линию *предела устойчивой работы* синхронного генератора при недовозбуждении.

С точки зрения уменьшения потерь генератора наиболее выгодным является возбуждение, соответствующее минимальному току статора, т. е. когда $\cos \varphi_1 = 1$. Но в большинстве случаев нагрузка генератора имеет индуктивный характер и для компенсации индуктивных токов (отстающих по фазе от напряжения сети) приходится несколько перевозбуждать генератор, создавая условия, при которых ток статора I_1 опережает по фазе напряжение сети U_c . Следует отметить, что для сохранения $\cos \varphi_1$ постоянным при изменениях активной нагрузки генератора требуется одновременно с этим корректировать значение тока возбуждения генератора.

3.4. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И КПД СИНХРОННЫХ МАШИН

Преобразование энергии в синхронной машине связано с потерями энергии. Все виды потерь в синхронной машине разделяются на основные и добавочные.

Основные потери в синхронной машине слагаются из электрических потерь в обмотке статора, потерь на возбуждение, магнитных и механических потерь.

Электрические потери в обмотке статора, Вт:

$$P_{\vartheta 1} = m_1 I_1^2 r_1, \quad (3.15)$$

где r_1 — активное сопротивление одной фазы обмотки статора при расчетной рабочей температуре, Ом.

Потери на возбуждение (Вт):

а) при возбуждении от отдельного возбуждательного устройства

$$P_B = I_B^2 r_B + \Delta U_{щ} I_B, \quad (3.16)$$

где r_B — активное сопротивление обмотки возбуждения при расчетной рабочей температуре, Ом; $\Delta U_{щ} = 2$ В — падение напряжения в контакте щеток;

б) при возбуждении от генератора постоянного тока (возбудителя), сочлененного с валом синхронной машины,

$$P_B = (I_B^2 r_B + \Delta U_{щ} I_B) / \eta_B, \quad (3.17)$$

где $\eta_B = 0,80 \dots 0,85$ — КПД возбудителя.

Магнитные потери синхронной машины происходят в сердечнике статора, который подвержен перемагничиванию вращающимся магнитным полем. Эти потери состоят из потерь от гистерезиса P_Γ и вихревых токов $P_{в.т.}$:

$$P_M = P_\Gamma + P_{в.т.} \quad (3.18)$$

Механические потери (Вт), равные сумме потерь на трение в подшипниках и потерь на вентиляцию (при самовентиляции машины),

$$P_{мех} \approx 3,68p \left(\frac{v_2}{40} \right)^3 \sqrt{10^3 I_1}, \quad (3.19)$$

где

$$v_2 = \pi(D_1 - 2\delta) n_1 / 60 \quad (3.20)$$

— окружная скорость на поверхности полюсного наконечника ротора, м/с; I_1 — конструктивная длина сердечника статора, мм.

Добавочные потери в синхронных машинах разделяются на два вида: пульсационные потери в полюсных наконечниках ротора и потери при нагрузке.

Добавочные пульсационные потери P_Π в полюсных наконечниках ротора обусловлены пульсацией магнитной индукции в зазоре из-за зубчатости внутренней поверхности статора. Эти потери, Вт, равны

$$P_\Pi = k_\Pi p b_p I_1 (10^{-4} Z_1 n_1)^{1,5} [B_\delta (k_{\delta 1} - 1) t_1]^2 \cdot 10^{-6}, \quad (3.21)$$

где k_Π — коэффициент, учитывающий толщину листов полюсов ротора: при толщине листов 1 мм $k_\Pi = 4,6$; при толщине листов 2 мм $k_\Pi = 8,6$; при массивных полюсных наконечниках $k_\Pi = 23,3$; b_p — ширина полюсного наконечника, мм; Z_1 — число пазов на статоре;

B_δ — магнитная индукция в зазоре, Тл; $k_{\delta 1}$ — коэффициент воздушного зазора статора; t_1 — зубцовое деление статора, мм.

Добавочные потери при нагрузке $P_{\text{доб}}$ в синхронных машинах определяют в процентах от подводимой мощности двигателей или от полезной мощности генераторов. Для синхронных машин мощностью до 1 000 кВт добавочные потери при нагрузке принимают равными 0,5 %, а для машин мощностью более 1 000 кВт — от 0,25 до 0,4 %.

Суммарные потери в синхронной машине, кВт:

$$\sum P = (P_{\text{э1}} + P_{\text{в}} + P_{\text{м1}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{п}} + P_{\text{доб}}) \cdot 10^{-3}. \quad (3.22)$$

Коэффициент полезного действия:

для синхронного генератора

$$\eta_{\text{г}} = 1 - \sum P / (P_{\text{ном}} + \sum P), \quad (3.23)$$

где

$$P_{\text{ном}} = m_1 U_{\text{1ном}} I_{\text{1ном}} \cos \varphi_1 \cdot 10^{-3} \quad (3.24)$$

— активная мощность, отбираемая от генератора при его номинальной нагрузке, кВт;

для синхронного двигателя

$$\eta_{\text{д}} = 1 - \sum P / P_{\text{ном}}; \quad (3.25)$$

$U_{\text{1ном}}$ и $I_{\text{1ном}}$ — фазные значения напряжения и тока обмотки статора.

КПД синхронной машины зависит от величины нагрузки ($\beta = P_2 / P_{\text{ном}}$) и от ее характера ($\cos \varphi_1$). У синхронных машин мощностью до 100 кВт КПД составляет 80...90 %, у более мощных машин — 92...99 %. Более высокие значения КПД относятся к турбо- и гидрогенераторам мощностью в десятки и даже сотни тысяч киловатт.

3.5. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Принцип действия синхронного двигателя основан на взаимодействии магнитного потока ротора, создаваемого обмоткой возбуждения или постоянными магнитами, с вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазным током, протекающим по трехфазной обмотке статора. При холостом ходе двигателя, когда

момент механической нагрузки $M_{\text{нагр}}$ равен нулю, оси магнитных полей статора и ротора совпадают. Поэтому электромагнитные силы, возникающие между полюсами магнитных полей статора и ротора, равны нулю и электромагнитный момент двигателя тоже равен нулю.

При работе двигателя в двигательном режиме его ротор под действием приложенного к валу внешнего момента нагрузки смещается на некоторый угол θ против направления вращения. В этом случае в результате электромагнитного взаимодействия между ротором и статором создаются электромагнитные силы, направленные по направлению вращения, т. е. образуется вращающий электромагнитный момент M , который стремится преодолеть действие внешнего момента $M_{\text{нагр}}$. Максимум момента двигателя M_{max} соответствует углу $\theta = 90^\circ$.

Если нагрузочный момент $M_{\text{нагр}}$, приложенный к валу электродвигателя, станет больше M_{max} , то двигатель «выпадает из синхронизма» и под действием внешнего момента $M_{\text{нагр}}$ останавливается. Зависимость $M(\theta)$ называется угловой характеристикой синхронной машины (см. (3.3)).

В соответствии с принципом обратимости электрических машин синхронная машина может работать не только в режиме генератора, но и в режиме двигателя, т. е. потреблять из сети электрическую энергию и преобразовывать ее в механическую.

Угловые характеристики. Угловые характеристики электромагнитного момента явнополюсного синхронного двигателя $M = f(\theta)$ и его составляющих $M_{\text{осн}} = f(\theta)$ и $M_{\text{р}} = f(\theta)$ представлены на рис. 3.16. Эти характеристики отличаются от угловых характеристик генератора (см. рис. 3.14) лишь тем, что располагаются в третьем квадранте осей координат, т. е. определяются отрицательными значениями углов θ и моментов M и $M_{\text{осн}}$, а также момента $M_{\text{р}}$ при $\theta = 0 \dots (-90^\circ)$.

Таким образом, в общем виде угловая характеристика синхронной машины представляет собой две полуволны результирующего момента M : положительную, соответствующую генераторному режиму работы (см. рис. 3.14), и отрицательную, соответствующую двигательному режиму работы (рис. 3.16). Переход машины из одного режима работы в другой происходит при $\theta = 0$.

Устойчивая работа синхронного двигателя соответствует участку угловой характеристики (рис. 3.16) при $\theta = 0 \dots (-\theta_{\text{кр}})$.

Отношение максимального электромагнитного момента M_{max} к номинальному $M_{\text{ном}}$ определяет перегрузочную способность синхронного двигателя

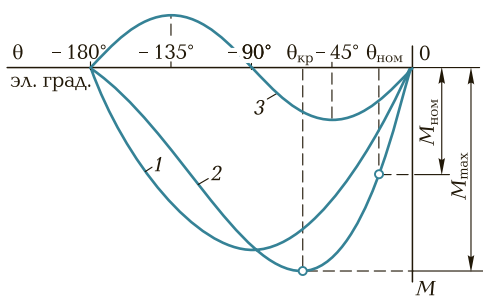


Рис. 3.16. Угловые характеристики (1...3) синхронного двигателя

$$\lambda_M = M_{\max} / M_{\text{ном}}$$

Обычно перегрузочная способность синхронных двигателей $\lambda_M = 1,7 \dots 3,0$, что при номинальной нагрузке двигателя соответствует $\theta_{\text{ном}} = 30 \dots 20$ эл. град. Ротор синхронного двигателя может вращаться только с синхронной частотой $n_1 = f_1 \cdot 60 / p$. Чтобы убедиться в этом, достаточно предположить, что ротор двигателя начнет вращаться с частотой $n_2 < n_1$. В какой-то момент времени, когда намагниченные полюсы ротора расположатся против одноименных полюсов вращающегося магнитного поля статора, нарушится магнитная связь между намагниченными полюсами ротора и полюсами вращающегося поля статора. Их одноименные полюсы при этом будут взаимно отталкиваться и ротор, перестав испытывать устойчивое действие вращающего электромагнитного момента, остановится.

Вращение ротора синхронных двигателей только с синхронной частотой составляет характерную особенность этих двигателей и часто определяет область их применения (например, для привода устройств, требующих стабильной частоты вращения).

При изменениях нагрузки на валу синхронного двигателя меняется угол θ . При этом ротор вследствие инерции вращающихся масс агрегата не сразу занимает положения, соответствующие новой нагрузке, а некоторое время совершает *колебательные движения*.

По своей конструкции синхронные двигатели в принципе не отличаются от синхронных генераторов, но все же имеют некоторые особенности. Их изготавливают преимущественно явнополюсными с $2p = 6 \dots 24$ полюсов; воздушный зазор делают меньшим, чем в генераторах такой же мощности, что способствует улучшению ряда параметров двигателя, в частности уменьшению пуска-

вого тока; демпферную (успокоительную) обмотку выполняют стержнями большего сечения, так как при пуске двигателя она является пусковой обмоткой; ширина полюсного наконечника достигает $0,9\tau$ вместо $0,7\tau$ в генераторах. Поэтому, несмотря на свойство обратимости, синхронные машины, выпускаемые промышленностью, имеют обычно целевое назначение — либо это синхронные генераторы, либо синхронные двигатели.

U-образные характеристики. Зависимость тока статора от тока возбуждения для синхронного двигателя представлена U-образными характеристиками (рис. 3.17). Ток возбуждения $I'_в$ соответствует работе синхронного двигателя при коэффициенте мощности $\cos \varphi_1 = 1$. При *недовозбуждении* ($I_в < I'_в$) синхронный двигатель работает с током статора, отстающим по фазе, а при *перевозбуждении* ($I_в > I'_в$) — с опережающим током статора.

Иначе говоря, синхронный двигатель является генератором реактивного тока: индуктивного по отношению к напряжению сети при недовозбуждении и емкостного при перевозбуждении. Указанная способность синхронных двигателей является их ценным качеством, которое используют для повышения коэффициента мощности электрических установок.

Асинхронные двигатели, являющиеся наиболее распространенными потребителями электроэнергии, работают с $\cos \varphi_1 < 1$, создавая в сетях значительные индуктивные токи. Если же параллельно группе асинхронных двигателей включить один или несколько синхронных двигателей, работающих с перевозбуждением, то возникающая в этой сети емкостная составляющая тока будет частично или полностью компенсировать индуктивную составляющую тока, обусловленную работой асинхронных двигателей. При этом электрическая система, разгруженная от реактив-

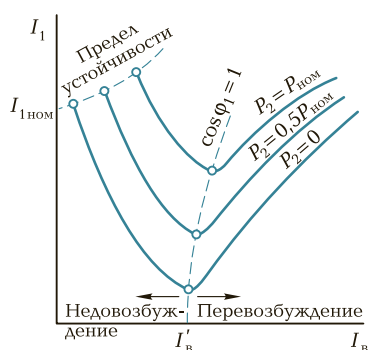
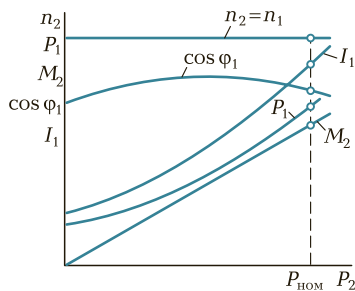


Рис. 3.17. U-образные характеристики синхронного двигателя

Рис. 3.18. Рабочие характеристики синхронного двигателя



ных токов, будет работать с $\cos \varphi_1 \approx 1$, что способствует уменьшению потерь электроэнергии. Необходимо, однако, отметить, что при перевозбуждении синхронный двигатель потребляет значительный ток статора. Поэтому синхронные двигатели, предназначенные для работы с перевозбуждением, имеют несколько большие габариты, а их КПД меньше, чем у двигателей, предназначенных для работы с $\cos \varphi_1 = 1$, когда ток статора и потери двигателя имеют минимальные значения.

Рабочие характеристики. Рабочие характеристики синхронного двигателя представляют собой зависимость частоты вращения ротора n_2 , потребляемой мощности P_1 , полезного момента M_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и тока в обмотке статора I_1 от полезной мощности двигателя P_2 (рис. 3.18). Частота вращения ротора n_2 всегда равна синхронной частоте $n_1 = f_1 \cdot 60/p$, поэтому график $n_2 = f(P_2)$ имеет вид прямой линии, параллельной оси абсцисс. Полезный момент на валу синхронного двигателя $M_2 = P_2/\omega_1$. Так как рабочие характеристики снимают при условии $f_1 = \text{const}$, то график $M_2 = f(P_2)$ имеет вид прямой линии, выходящей из начала координат. Мощность на входе двигателя

$$P_1 = P_2 + \sum P.$$

С ростом нагрузки на валу двигателя увеличиваются также и потери $\sum P$, поэтому потребляемая мощность P_1 растет быстрее полезной мощности P_2 и график $P_1 = f(P_2)$ имеет несколько криволинейный вид.

Вид графика $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ зависит от настройки тока возбуждения: если в режиме холостого хода ток возбуждения установлен таким, что $\cos \varphi_1 = 1$, то с ростом нагрузки коэффициент мощности снижается. Если же установить $\cos \varphi_1 = 1$ при номинальной нагрузке, то при недогрузке двигатель будет забирать из сети реактивный опережающий ток, а при перегрузке — отстающий. Обычно

устанавливают ток возбуждения таким, чтобы $\cos \varphi_1 = 1$ при средней нагрузке (рис. 3.18). В этом случае коэффициент мощности во всем диапазоне нагрузок остается достаточно высоким. Если же установить ток в обмотке возбуждения синхронного двигателя таким, чтобы $\cos \varphi_1 = 1$ был при нагрузке, несколько превышающей номинальную, то при номинальной нагрузке $\cos \varphi_1 \approx 0,8$ и двигатель будет потреблять из сети опережающий по отношению к напряжению сети ток, что приведет к повышению коэффициента мощности этой сети. В этом отношении синхронные двигатели выгодно отличаются от асинхронных, работающих с отстающим по фазе током (особенно при недогрузке двигателя) и снижающих энергетические показатели питающей сети.

Ток в обмотке статора двигателя

$$I_1 = P_1 / (m_1 U_1 \cos \varphi_1).$$

Из этого выражения видно, что ток I_1 с увеличением нагрузки на валу двигателя растет быстрее, чем потребляемая мощность P_1 , вследствие уменьшения $\cos \varphi_1$.

Так как ротор синхронного двигателя вращается в ту же сторону, что и поле статора, то направление вращения ротора определяется порядком следования фаз линейных проводов, подведенных к обмотке статора, и порядком расположения фаз обмотки статора. Для изменения направления вращения трехфазного синхронного двигателя необходимо переключить два линейных привода, подведенных из сети к выводам обмотки статора.

В заключение необходимо отметить, что синхронные двигатели по сравнению с асинхронными имеют преимущество, заключающееся в том, что они могут работать с $\cos \varphi_1 = 1$, не создавая в питающей сети индуктивных токов (вызывающих дополнительные потери). Более того, при работе с перевозбуждением синхронные двигатели создают в сети емкостный ток, чем способствуют повышению коэффициента мощности энергосистемы в целом. Другое достоинство синхронных двигателей состоит в том, что, как это следует из (3.8), основная составляющая электромагнитного момента пропорциональна напряжению сети U_1 , а у асинхронных двигателей электромагнитный момент пропорционален U_1^2 . По этой причине при понижении напряжения в сети синхронные двигатели сохраняют большую перегрузочную способность, чем асинхронные.

Синхронные двигатели изготавливают на большие мощности — от сотен до тысяч киловатт. Объясняется это тем, что при мень-

ших мощностях применение синхронных двигателей в электроприводе нецелесообразно по технико-экономическим показателям. Обычно СД изготавливают на напряжения 6 000 и 10 000 В. Лишь только некоторые типоразмеры синхронных двигателей серий СД2 и СД3 изготавливают на напряжение 380 В.

Обычно серии синхронных двигателей имеют целевое назначение, т. е. каждая из серий разработана и применяется для привода конкретных рабочих механизмов. Например, серия СДК предназначена для привода компрессоров, серия СДМЗ — для привода шаровых мельниц, серия ВДС — для привода насосов и т. д. Исключения составляют серии СДН-2 и СДНЗ-2 на напряжение 6 000 и 10 000 В мощностью от 315 до 1 000 кВт, имеющие общепромышленное назначение.

Пуск является наиболее напряженным элементом работы СД, поэтому в сериях СД обычно оговариваются допустимые условия этой операции. Например, для серий СДН-2 и СДНЗ-2 указано, что пуск этих двигателей в холодном состоянии допускается не более двух раз с интервалом 5 мин, а в горячем состоянии — не более одного раза. При этом момент нагрузки на валу не должен превышать $0,4M_{ном}$. В некоторых сериях пуск допускается лишь при отсутствии нагрузки.

Для ограничения пускового тока в СД применяют те же методы, что и в АД с короткозамкнутым ротором. Перегрузочная способность СД составляет от 1,7 до 3,0.

К недостаткам синхронных двигателей относятся их более сложная конструкция и повышенная стоимость по сравнению с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Кроме того, для работы синхронного двигателя требуется устройство для питания постоянным током обмотки возбуждения.

3.6. СИНХРОННЫЙ КОМПЕНСАТОР

Синхронный компенсатор (СК) представляет собой синхронную машину, предназначенную для генерирования реактивной мощности. Синхронный компенсатор включают в электрическую систему в целях повышения ее коэффициента мощности. На рис. 3.19 показана система, состоящая из синхронного генератора (СГ), повышающего ТрI и понижающего ТрII трансформаторов, линии электропередачи ЛЭП, потребителя Z (например, группа асинхронных двигателей) и синхронного компенсатора СК, включенного непосредственно на входе потребителя. Синхронный ком-

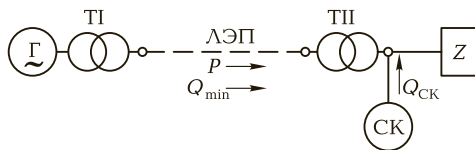


Рис. 3.19. Схема включения синхронного компенсатора (СК) в электрическую систему

пенсатор, включенный в сеть, работает как синхронный двигатель без нагрузки ($P_2 = 0$), т. е. в режиме холостого хода.

Принцип происходящих при этом явлений состоит в следующем. Асинхронные двигатели, трансформаторы и другие виды электромагнитных нагрузок создают в цепях переменного тока значительные индуктивные токи.

В результате коэффициент мощности данного участка сети понижается, а потери, величина которых пропорциональна квадрату тока, увеличиваются. Синхронный компенсатор работает в режиме перевозбуждения (см. рис. 3.17) и создает в сети ток $I_{СК}$, опережающий по фазе напряжение сети U_c на 90° (емкостной ток). Этот ток, накладываясь на реактивную (индуктивную) составляющую тока потребителя, компенсирует ее в значительной части, так что реактивная составляющая тока оказывается небольшой, а общий ток в данной сети уменьшается. Это создает большой энергосберегающий эффект, поскольку ведет к уменьшению потерь в сети, величина которых пропорциональна квадрату тока сети.

В некоторых случаях СК работают с недозавозбуждением. Необходимость в этом возникает, если ток в системе содержит значительную емкостную составляющую, которая не компенсируется индуктивной составляющей тока потребителей этой сети. Обычно степень возбуждения СК регулируют посредством автоматических устройств.

Синхронные компенсаторы применяют также для стабилизации напряжения в сети при передаче энергии по линиям большой протяженности. При больших индуктивных нагрузках напряжение в конце линии (у потребителей) оказывается намного меньше, чем в начале; при малых нагрузках, наоборот, под влиянием емкостных сопротивлений линии напряжение в конце линии может даже повышаться по сравнению с напряжением в начале. Если же в конце линии (у потребителей) включить СК, работающий при больших нагрузках с перевозбуждением и при малых нагрузках

с недо возбуждением, то это позволит поддерживать напряжение в конце линии практически неизменным.

Условия нагревания СК при опережающем токе (при перевозбуждении) более тяжелые, чем при отстающем (при недо возбуждении), поэтому номинальной мощностью компенсатора считают мощность при перевозбуждении.

Пример 3.1. Потребитель, включенный в сеть переменного тока напряжением $U_c = 6,3$ кВ, потребляет мощность $1\,500$ кВ·А при коэффициенте мощности $\cos \varphi = 0,7$. Определить мощность синхронного компенсатора, необходимого для повышения коэффициента мощности в сети до $\cos \varphi' = 0,95$ ($\sin \varphi' = 0,31$). Определить также силу тока нагрузки в сети до и после компенсации.

Решение. До включения СК реактивная мощность сети

$$Q = S \sin \varphi = 1\,500 \cdot 0,7 = 1\,050 \text{ квар,}$$

ток нагрузки в сети

$$I_c = S / (\sqrt{3} U_c) = 1\,500 / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = 138 \text{ А;}$$

активная составляющая этого тока

$$I_{c,a} = I_c \cos \varphi = 138 \cdot 0,7 = 97 \text{ А.}$$

После включения СК реактивная мощность уменьшилась до

$$Q' = S \sin \varphi' = 1\,500 \cdot 0,31 = 450 \text{ квар.}$$

Таким образом, для повышения коэффициента мощности установки от $\cos \varphi = 0,7$ до $\cos \varphi' = 0,95$ требуется включить СК мощностью

$$Q_{c,k} = 1\,050 - 450 = 600 \text{ квар.}$$

При этом активная составляющая тока сети не изменится ($I_{ZR} = 97$ А), а реактивная составляющая этого тока станет равной

$$I'_{ZL} = Q' / (\sqrt{3} U_c) = 450 / (1,73 \cdot 6,3) = 42 \text{ А.}$$

Следовательно, ток в сети после включения СК

$$I'_c = \sqrt{I_{c,a}^2 + I_{c,p}^2} = \sqrt{97^2 + 42^2} = 104 \text{ А.}$$

Обычно коэффициент мощности увеличивают до $0,92 \dots 0,95$, так как экономия, получаемая от повышения коэффициента мощности до единицы, не оправдывает увеличивающихся расходов, обусловленных возросшей мощностью синхронного компенсатора. Так, если в рассматриваемом примере потребовалось бы увеличить коэффициент мощности в сети до единицы, то пришлось бы применить синхронный компенсатор мощностью $1\,050$ квар, т. е. почти в два раза больше, чем при $\cos \varphi' = 0,95$.

Синхронные компенсаторы — это электрические машины большой мощности: от 10 до 160 тыс. кВт·А. Выполняют их обычно с горизонтальным расположением вала на напряжение от 6,6 до 16 кВ, частотой 50 Гц. Число полюсов в СК обычно составляет $2p = 6$ или 8, что соответствует частоте вращения ротора 1000 и 750 мин⁻¹. В синхронных компенсаторах современных серий применен асинхронный пуск, поэтому ротор СК снабжен пусковой клеткой.

Вал компенсатора не передает вращающего момента, поэтому при его расчете учитывают лишь силу тяжести ротора и силу магнитного притяжения. В итоге вал СК по сравнению с валом синхронного двигателя имеет уменьшенное сечение. Это способствует уменьшению габаритов и облегчению СК, применению подшипников более легких серий. Так как вал СК не имеет выступающего конца, то СК сравнительно легко герметизировать с целью применения в нем водородного охлаждения.

Наиболее важными характеристиками СК являются U-образные характеристики, определяющие основные параметры компенсатора: значения токов в обмотке статора и в обмотке возбуждения. В принципе, эти характеристики не отличаются от U-образной характеристики синхронного двигателя в режиме холостого хода ($P_2 = 0$). Указанные характеристики строят для разных напряжений сети.

Синхронный компенсатор не несет активной нагрузки (его электромагнитная мощность $P_{эм} \approx 0$) и работает при значении угла $\theta = 0$, что обеспечивает СК большую перегрузочную способность.

3.7. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Синхронные машины с постоянными магнитами (магнитоэлектрические) не имеют обмотки возбуждения на роторе, а возбуждающий магнитный поток у них создается постоянными магнитами, расположенными на роторе. Статор этих машин обычной конструкции с двух- или трехфазной обмоткой.

Эти машины чаще всего используют в качестве двигателей небольшой мощности. Синхронные генераторы с постоянными магнитами применяют реже, главным образом в качестве автономно работающих генераторов повышенной частоты, малой и средней мощности.

Синхронные магнитоэлектрические двигатели. Эти двигатели получили распространение в двух конструктивных исполнениях: с радиальным и аксиальным расположением постоянных магнитов.

При радиальном расположении постоянных магнитов пакет ротора с пусковой клеткой, выполненный в виде полого цилиндра, закрепляют на наружной поверхности явно выраженных полюсов постоянного магнита 3. В цилиндре делают межполюсные прорезы, предотвращающие замыкание потока постоянного магнита в этом цилиндре (рис. 3.20, а).

При аксиальном расположении магнитов конструкция ротора аналогична конструкции ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя. К торцам этого ротора прижаты кольцевые постоянные магниты (рис. 3.20, б).

Конструкции с аксиальным расположением магнита применяют в двигателях малого диаметра мощностью до 100 Вт, а с радиальным расположением — в двигателях большего диаметра мощностью до 500 Вт и более.

Физические процессы, протекающие при асинхронном пуске этих двигателей, имеют некоторую особенность, обусловленную тем, что магнитоэлектрические двигатели пускают в возбужденном состоянии.

Электромагнитные процессы в магнитоэлектрических синхронных двигателях в принципе аналогичны процессам в синхронных двигателях с электромагнитным возбуждением.

Достоинства магнитоэлектрических синхронных двигателей — простота схем соединения, обусловленная отсутствием обмотки

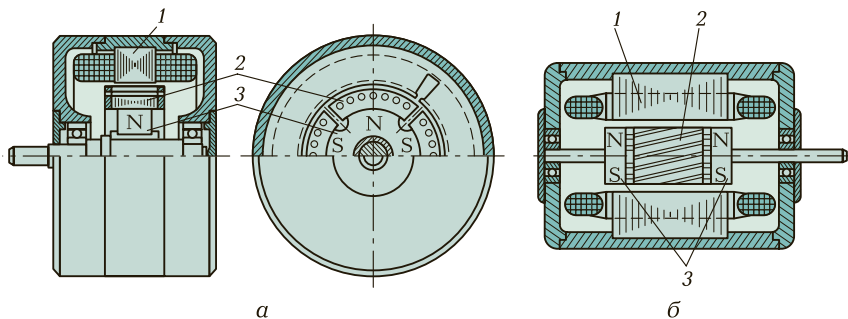


Рис. 3.20. Магнитоэлектрические синхронные двигатели с радиальным (а) и аксиальным (б) расположением постоянных магнитов:

1 — статор; 2 — короткозамкнутый ротор; 3 — постоянный магнит

возбуждения и источника постоянного тока для возбуждения двигателя, высокие энергетические показатели (КПД и $\cos \varphi_1$), повышенная устойчивость работы в синхронном режиме и равномерность частоты вращения, а также способность синфазного вращения нескольких двигателей, включенных в одну сеть.

Недостатки магнитоэлектрических синхронных двигателей — повышенная стоимость по сравнению с синхронными двигателями других типов, обусловленная высокой стоимостью и сложностью обработки постоянных магнитов, выполненных из сплавов, обладающих большой коэрцитивной силой (сплавы ални, алнико, магнико и др.).

Синхронные реактивные двигатели. Отличительная особенность синхронных реактивных двигателей (СРД) — отсутствие у них возбуждения со стороны ротора. Основной магнитный поток в этом двигателе создается исключительно за счет МДС обмотки статора. В двух- и трехфазных СРД эта МДС является вращающейся.

Для выяснения принципа действия СРД обратимся к выражению электромагнитного момента явнополюсной синхронной машины [см. (3.7)], из которого следует, что если отключить обмотку возбуждения ($E_0 = 0$), то основная составляющая момента становится равной нулю и на ротор машины продолжает действовать лишь реактивная составляющая момента [см. (3.9)]:

$$M_p = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta.$$

Однако при значении угла $\theta = 90^\circ$ реактивный момент $M_p = 0$. Такая зависимость момента M_p от угла θ является принципиальной для реактивного момента.

Графически эта зависимость представлена характеристикой 3 на рис. 3.16. Непременное условие создания реактивного момента M_p — явнополюсная конструкция ротора.

Мощность СРД и развиваемый им момент меньше, чем у синхронного двигателя с возбужденными полюсами ротора. Объясняется это тем, что у СРД из-за отсутствия магнитного потока ротора ЭДС $E_0 = 0$, поэтому основная составляющая электромагнитного момента $M_{\text{осн}} = 0$ и электромагнитный момент СРД определяется лишь реактивной составляющей ($M = M_p$). Поэтому при одинаковых габаритах синхронного двигателя с возбужденными полюсами ротора и СРД мощность на валу и развиваемый момент у СРД намного меньше.

К недостаткам СРД следует также отнести невысокие значения коэффициента мощности и КПД. Объясняется это значительным намагничивающим током статора, так как возбуждение СРД происходит за счет магнитного поля статора.

В СРД применяют асинхронный пуск. Для этого ротор снабжают короткозамкнутой пусковой клеткой.

На торцах секционированного ротора имеются отлитые из алюминия кольца, замыкающие алюминиевые прослойки ротора, образуя короткозамкнутую пусковую клетку.

Простота конструкции и высокая эксплуатационная надежность обеспечили СРД малой мощности широкое применение в устройствах автоматики для привода самопишущих приборов, в устройствах звуко- и видеозаписи и других установках, требующих строгого постоянства частоты вращения.

Гистерезисные двигатели. Работа гистерезисного двигателя основана на действии гистерезисного момента. На рис. 3.21, *а* показаны два полюса внешнего магнитного поля (условное изображение магнитного поля статора), между которыми расположен цилиндр (ротор) из магнитно-твердого материала. Под действием внешнего магнитного поля ротор намагничивается. На стороне ротора, обращенной к северному полюсу внешнего магнитного поля, возбуждается южный полюс, а на стороне ротора, обращенной к южному полюсу постоянного магнита, — северный полюс. На ротор начинают действовать силы $F_{M'}$, направленные радиально к его поверхности. Если полюсы внешнего магнитного поля вращать вокруг ротора, то вследствие явления *магнитного*

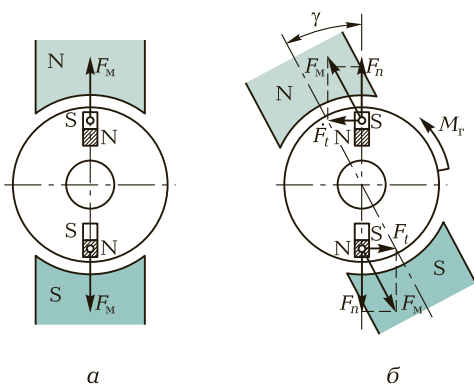


Рис. 3.21. К понятию о гистерезисном моменте (пояснения приведены в тексте)

запаздывания (*гистерезиса*) активная часть ротора будет перемагничиваться с некоторым отставанием во времени относительно изменения направления внешнего вращающегося магнитного поля. Силы F_m , действующие на ротор, также изменяют свое направление на угол γ , а тангенциальные составляющие этих сил F_t создадут гистерезисный момент M_r (рис. 3.21, б).

Гистерезисный двигатель может работать с синхронной и асинхронной частотами вращения. Однако работа двигателя в асинхронном режиме неэкономична, так как связана со значительными потерями на перемагничивание ротора, величина которых возрастает с увеличением скольжения.

Достоинства гистерезисных двигателей — простота конструкции, бесшумность и надежность в работе, большой пусковой момент, плавность входа в синхронизм, сравнительно высокий КПД, малое изменение кратности тока от пуска до номинальной нагрузки ($I_{\text{п}}/I_{\text{ном}} = 1,3 \dots 1,4$).

Недостатки гистерезисных двигателей — низкий коэффициент мощности ($\cos \varphi_1 = 0,4 \dots 0,5$) и высокая стоимость из-за повышенной стоимости магнитно-твердых материалов и сложности их обработки. Кроме того, при резких колебаниях нагрузки гистерезисные двигатели склонны к качаниям, что создает неравномерность хода (вращения). Объясняется это отсутствием у гистерезисных двигателей пусковой клетки, которая обычно при резких изменениях нагрузки оказывает на ротор успокаивающее (демпфирующее) действие. Наиболее сильные качания наблюдаются у шихтованного ротора, в котором вихревые токи сильно ограничены. Вызываемая качаниями неравномерность вращения ограничивает области применения гистерезисных двигателей.

Шаговые двигатели. Шаговые (импульсные) двигатели (ШД) используют обычно в качестве исполнительных двигателей, преобразующих электрические сигналы (импульсы напряжения) в угловые или линейные дискретные (скачкообразные) перемещения (шаги). Наибольшее применение ШД получили в электроприводах с программным управлением.

Различают шаговые двигатели с активным (возбужденным) и реактивным ротором. Шаговые двигатели с активным ротором имеют обмотку возбуждения или выполнены с постоянными магнитами на роторе; шаговые двигатели с реактивным ротором не имеют обмотки возбуждения, а их ротор изготовлен из магнитно-мягкого материала. Обмотку управления ШД обычно располагают на статоре и делают одно- или многофазной (чаще трех- или четырехфазной).

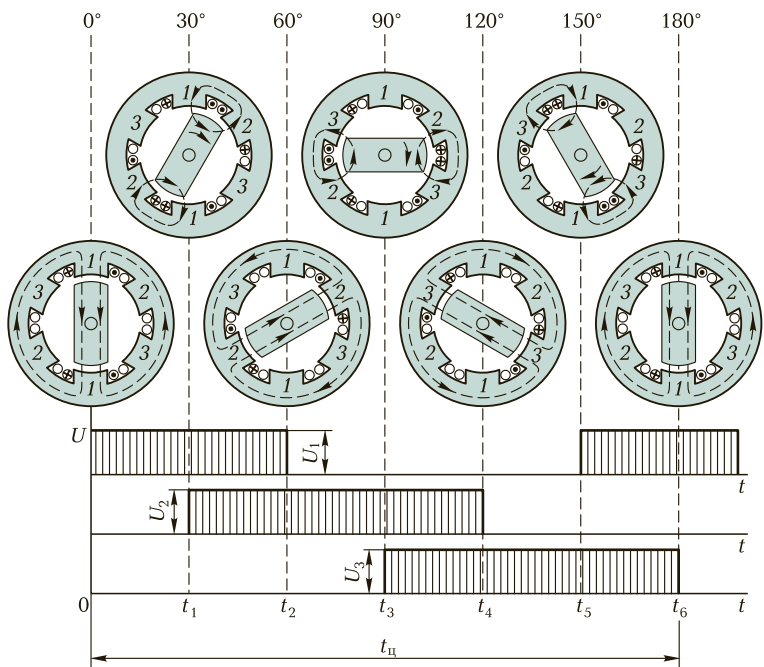


Рис. 3.22. Принцип действия реактивного шагового двигателя

Рассмотрим принцип действия шагового двигателя на примере реактивного трехфазного ШД, статор которого имеет шесть явно выраженных полюсов (по два полюса на фазу), а ротор — два полюса (рис. 3.22).

При прохождении импульса тока в фазе 1 обмотки управления ротор занимает положение, соответствующее действию электромагнитных сил, т. е. по оси полюсов 1—1. В момент времени t_1 появится импульс тока в фазе 2. При этом на ротор будут действовать силы, обусловленные одновременным воздействием двух МДС (полюсов 1—1 и 2—2). В результате ротор повернется по часовой стрелке и займет положение, промежуточное между полюсами 1—1 и 2—2, т. е. повернется на шаг $\alpha_{\text{ш}} = 30^\circ$. В момент t_2 импульс тока в фазе 1 прекратится и ротор, сделав еще шаг $\alpha_{\text{ш}} = 30^\circ$, займет положение по оси полюсов 2—2. В момент t_3 появится импульс тока в фазе 3 и ротор, повернувшись еще на 30° , займет положение между полюсами статора 2—2 и 3—3. В моменты времени t_4 , t_5 и t_6 ротор также будет совершать шаги по 30°

и в конце цикла (момент t_6) займет положение по оси полюсов статора $1-1$, совершив за этот цикл поворот на 180° .

В последующие циклы процессы в ШД будут повторяться. Таким образом, рассматриваемый реактивный трехфазный ШД работает по шеститактной схеме коммутации с *раздельно-совместным включением фазных обмоток управления*: $1 \rightarrow 12 \rightarrow 2 \rightarrow 23 \rightarrow 3 \rightarrow 31 \rightarrow \dots$

Работают реактивные ШД от однополярных импульсов напряжения, так как изменение полярности этих импульсов не меняет направления реактивного момента. Для изменения направления вращения ротора рассматриваемого ШД необходимо поменять схему коммутации обмоток, например: $1 \rightarrow 13 \rightarrow 3 \rightarrow 32 \rightarrow 2 \rightarrow 21 \rightarrow \dots$. Если в этом двигателе применить раздельное включение обмоток, т.е. принять схему коммутации $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \dots$, то шаг двигателя $\alpha_{\text{ш}} = 60^\circ$. Шаг двигателя определяется выражением

$$\alpha_{\text{ш}} = 360^\circ / (2p_2 m_\gamma k), \quad (3.26)$$

где $2p_2$ — число полюсных выступов на роторе; m_γ — число фазных обмоток управления, пространственно смещенных относительно друг друга; k — коэффициент, определяемый способом включения фазных обмоток управления (при раздельном включении $k = 1$, при раздельно-совместном $k = 2$).

Уменьшение шага $\alpha_{\text{ш}}$ способствует повышению устойчивости и точности работы ШД. Для уменьшения шага $\alpha_{\text{ш}}$ увеличивают число полюсных выступов на роторе $2p_2$. Так, если в рассматриваемом двигателе применить ротор крестообразного сечения ($2p_2 = 4$), то при шеститактной коммутации $\alpha_{\text{ш}} = 15^\circ$.

Шаговые двигатели с активным ротором (с обмоткой возбуждения или постоянными магнитами на роторе) позволяют получить большие значения вращающего момента, а также обеспечивают фиксацию ротора при отсутствии управляющего сигнала.

Один из важных параметров ШД — *частота приемистости* — максимальная частота следования управляющих импульсов, при которой ротор втягивается в синхронизм с места без потери шага. У шаговых двигателей реактивного типа частота приемистости при номинальной нагрузке достигает 1 000 ... 1 300 Гц. С увеличением шага частота приемистости уменьшается. Шаговый двигатель работает в комплекте с коммутатором — устройством, преобразующим заданную последовательность управляющих импульсов в m -фазную систему прямоугольных импульсов напряжения.

При рассмотрении принципа работы шагового двигателя влияние нагрузочного момента на валу двигателя не учитывалось. Если же на вал шагового двигателя действует статический нагрузочный

момент M_c , то при переключении управляющего импульса с одной фазы на другую МДС статора повернется на угол $\alpha_{ш}$, а ротор двигателя, поворачиваясь за вектором МДС, будет отставать от него на угол $\Delta\theta_c$, называемый *углом статической ошибки* шагового двигателя, эл. град.:

$$\Delta\theta_c = \arcsin (M_H / M_{\max}),$$

где M_{\max} — максимальный статический момент, соответствующий углу смещения ротора относительно вектора МДС статора $\theta = 90$ эл. град.

Быстродействие шаговых двигателей определяется скоростью протекания электромагнитных процессов при переключении управляющих импульсов напряжения с одной фазы статора на другую. Скорость протекания этих процессов оценивается электромагнитной постоянной времени (τ):

$$\tau = L_\phi / r_\phi,$$

где L_ϕ — индуктивность обмотки одной фазы статора, Гн; r_ϕ — активное сопротивление обмотки одной фазы статора, Ом.

Для повышения быстродействия шагового двигателя в обмотки фаз статора последовательно включают резисторы $R_{\text{доб}}$, тогда

$$\tau = L_\phi / (r_\phi + R_{\text{доб}}).$$

Энергетическим показателем шагового двигателя является величина потребляемой мощности P_1 . Частота вращения шагового двигателя регулируется изменением частоты подачи управляющих импульсов напряжения на фазы обмотки статора.

Синхронный волновой двигатель. Стремление получить двигатель с небольшой частотой вращения вала при значительном вращающем моменте привело к созданию волнового двигателя, представляющего собой сочетание синхронного двигателя с волновой механической передачей.

Статор волнового двигателя с трехфазной или двухфазной обмоткой создает вращающееся симметричное магнитное поле, вызывающее механические деформации гибкого элемента волновой передачи, обеспечивающей значительное передаточное отношение (до 100 и более) при небольших размерах и массе.

Основные элементы волновой передачи — наружный (неподвижный) цилиндр 4 с зубчатой внутренней поверхностью 3 (рис. 3.23, а) и числом зубцов Z_1 , внутри которого расположен гибкий тонкостенный цилиндр 1 с зубчатой наружной поверхностью 2, имеющей число зубцов $Z_2 < Z_1$.

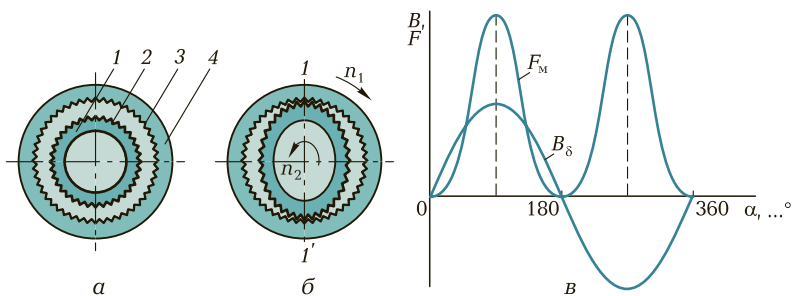


Рис. 3.23. Принцип действия (а...в) синхронного волнового двигателя:
1 и 4 — цилиндры; 2 и 3 — поверхности

Если внутренний гибкий цилиндр деформировать в радиальном направлении по оси $1-1'$ (рис. 3.23, б) так, чтобы зубчатые поверхности наружного и внутреннего цилиндров пришли в зацепление, а затем вращать ось деформации $1-1'$ по часовой стрелке с частотой n_1 , то произойдет обкатывание тонкостенного внутреннего цилиндра 1 по внутренней поверхности наружного цилиндра 2. При этом тонкостенный внутренний цилиндр будет вращаться в направлении, противоположном вращению оси $1-1'$ с частотой, мин^{-1} :

$$n_2 = n_1 k_p, \tag{3.27}$$

где $k_p = (Z_1 - Z_2)/Z_1$ — коэффициент редукиции скорости волнового двигателя.

В волновом двигателе наружный (неподвижный) цилиндр расположен на статоре, а гибкий (вращающийся) цилиндр — на роторе. Радиальные деформации внутреннего цилиндра создаются за счет сил магнитного притяжения этого цилиндра к полюсам статора. Вращение оси деформации $1-1'$ внутреннего цилиндра создается вращающимся магнитным полем статора.

Рассмотрим устройство волнового двигателя (рис. 3.24). В его алюминиевом корпусе 1 расположен шихтованный сердечник статора 2 с многофазной обмоткой 3, которая при включении в сеть переменного тока создает вращающееся магнитное поле с частотой вращения n_1 . В центральной части сердечника статора находится неподвижное кольцо 4 с зубцами Z_1 на внутренней поверхности. Ротор состоит из тонкостенного гибкого стакана б, на котором расположено гибкое кольцо 5 с зубцами Z_2 на внешней поверхности. Гибкое кольцо 5 и неподвижное кольцо 4 образуют волновую передачу. Вдоль внутренней поверхности полого стака-

на 6 ротора расположены подвижные относительно друг друга секторы 7 из ферромагнитного материала. Под действием сил магнитного притяжения, создаваемого вращающимся полем статора, секторы могут перемещаться в радиальном направлении, вызывая радиальные деформации гибкого кольца 5. К внутренней поверхности стакана ротора секторы прижимаются эластичными цилиндрическими кольцами 8.

При включении обмотки статора 3 в сеть в магнитной системе двигателя возникает вращающееся магнитное поле, которое воздействует на ферромагнитные секторы 7, создавая на них поочередно силы магнитного притяжения. В итоге создается волна деформации, вращающаяся синхронно с вращающимся магнитным полем с частотой n_1 , вызывая деформацию гибких колец 8 и 5, как это показано на рис. 3.23, б. При этом ротор двигателя вращается в направлении, противоположном вращению поля статора с частотой n_2 . Так как вращающееся магнитное поле статора взаимодействует с невозбужденным ротором, то рассмотренный волновой двигатель является синхронным двигателем реактивного типа.

Применение волновых двигателей ограничивается некоторой сложностью их конструкции, обусловленной трудностью изготовления гибкого элемента ротора.

Индукторные синхронные машины. Некоторые устройства, например установки индукционного нагрева, гироскопические и радиолокационные устройства, требуют для своей работы переменного тока повышенной частоты, выражаемой сотнями и даже тысячами герц. Получение таких переменных токов посредством син-

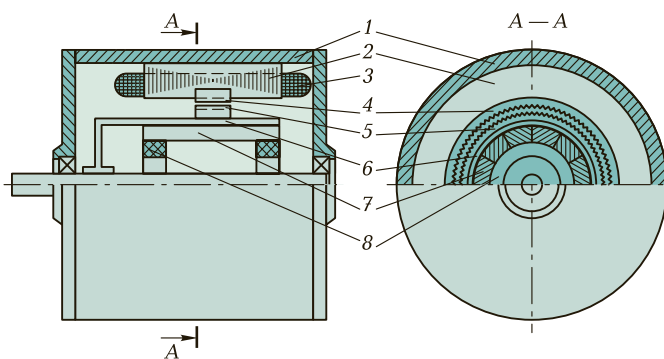


Рис. 3.24. Устройство синхронного волнового двигателя:

1 — корпус; 2 — сердечник статора; 3 — обмотка; 4 и 5 — кольца; 6 — стакан; 7 — сектор; 8 — цилиндрическое кольцо

хронных генераторов обычной конструкции сопряжено с трудностями, связанными либо с увеличением частоты вращения (более 3000 мин^{-1}), либо с чрезмерным числом полюсов, либо с одновременным применением обоих мероприятий. Однако повышение частоты вращения ведет к возрастанию центробежных усилий в роторе до опасных значений, а увеличение числа полюсов приводит к такому уменьшению полюсного деления, при котором размещение обмотки на статоре становится практически невозможным.

Для получения переменного тока повышенной частоты (до 30 кГц) применяют индукторные генераторы, отличительным признаком которых является то, что за один период магнитный поток в них не меняет своего знака, как в обычных синхронных генераторах, а пульсирует.

Существует несколько конструктивных схем индукторных генераторов. Все они основаны на создании пульсаций магнитного потока за счет изменения проводимости магнитной цепи, т. е. за счет зубцовых пульсаций магнитного потока. Для этого статору и ротору генератора придают зубчатую структуру. Когда зубец ротора находится против зубца статора, то магнитный поток в зубце статора приобретает наибольшее значение, когда же против зубца статора расположен паз ротора, то магнитный поток в этом зубце статора становится наименьшим. При этом частота изменений переменного магнитного потока, а следовательно, и частота ЭДС, наведенной в рабочей обмотке этим потоком, пропорциональны числу зубцов ротора Z_2 :

$$f_1 = Z_2 n_2 / 60.$$

Коэффициент полезного действия генераторов индукторного типа несколько ниже, чем у генераторов промышленной частоты (50 Гц), из-за повышенных электрических потерь в обмотке статора, обусловленных эффектом вытеснения тока, вызывающего увеличение активного сопротивления обмотки. Отсутствие обмоток на роторе позволяет исключить в индукторном генераторе контактные кольца. Это упрощает конструкцию генератора и повышает его надежность.

На рис. 3.25 показано устройство генератора индукторного типа.

Индукторная синхронная машина обратима, т. е. она может работать не только в генераторном, но и в двигательном режиме. Индукторные синхронные двигатели позволяют получать весьма малые частоты вращения без применения механических редукторов. Синхронная частота вращения такого двигателя при частоте

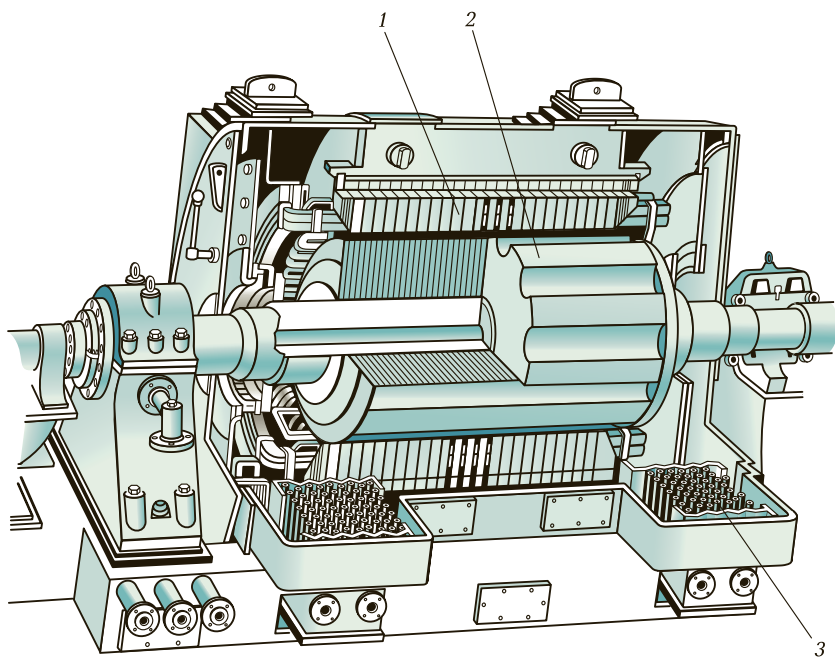


Рис. 3.25. Возбудитель индукторного типа мощностью 2 700 кВ·А:

1 — статор; 2 — ротор; 3 — газоохладитель

питающего напряжения f_1 зависит от числа зубцов Z_2 в сердечнике ротора: $n_1 = f_1 \cdot 60 / Z_2$. Например, при $f_1 = 50$ Гц и $Z_2 = 100$ получим $n_1 = 50 \cdot 60 / 100 = 30$ мин⁻¹.

Для создания вращающегося магнитного поля обмотку статора индукторного двигателя делают либо трехфазной, либо однофазной. В последнем случае на статоре помимо рабочей располагают еще и пусковую обмотку, включаемую в сеть через пусковой конденсатор.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие существуют способы возбуждения синхронных машин?
2. Объясните назначение тиристорного преобразователя в системе самовозбуждения синхронного генератора.
3. Объясните устройство явно- и неявнополюсных роторов синхронных машин.
4. Объясните устройство синхронного двигателя серии СДН-2.

5. Каковы достоинства и недостатки водородного охлаждения электрических машин?
6. Чем ограничивается область устойчивой работы синхронного двигателя?
7. Объясните процесс пуска синхронного двигателя.
8. Как регулируется коэффициент мощности синхронного двигателя?
9. Каково назначение синхронного компенсатора?
10. Каковы достоинства и недостатки синхронных двигателей по сравнению с асинхронными?
11. В чем различие шаговых двигателей с активным и реактивным роторами?
12. Что такое частота приемистости шагового двигателя?
13. Чем достигается большая частота пульсаций магнитного потока в индукторном генераторе?

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА И ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрические машины постоянного тока используют как в качестве генераторов, так и двигателей.

Наибольшее применение имеют двигатели постоянного тока, диапазон мощности которых достаточно широкий: от долей ватта (для привода устройств автоматики) до нескольких тысяч киловатт (для привода прокатных станков, шахтных подъемников и других механизмов). Двигатели постоянного тока широко используются для привода подъемных средств в качестве крановых двигателей и привода транспортных средств в качестве тяговых двигателей.

Основными преимуществами двигателей постоянного тока по сравнению с бесколлекторными двигателями переменного тока являются хорошие пусковые и регулировочные свойства, возможность получения частоты вращения более 3000 мин^{-1} . К недостаткам двигателей данного типа относятся высокая стоимость (в два-три раза выше стоимости асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором), некоторая сложность в изготовлении, недостаточная надежность.

Все эти недостатки машин постоянного тока обусловлены наличием в них щеточно-коллекторного узла, который к тому же является источником радиопомех и пожароопасности, что ограничивает их применение.

Однако двигатели постоянного тока в некоторых случаях пока незаменимы, так как обладают большой перегрузочной способностью, хорошими пусковыми свойствами, большой глубиной регулирования частоты вращения и имеют механические характеристики, удовлетворяющие всему комплексу требований современного электропривода.

В данной главе кроме машин постоянного тока общего назначения рассмотрены некоторые виды машин специального назначения. В последние годы были разработаны вентильные двигатели постоянного тока, в которых коллекторный узел заменен тиристорным преобразователем.

В настоящее время машины постоянного тока в качестве генераторов имеют ограниченное применение. Объясняется это широким использованием в качестве источников постоянного тока полупроводниковых выпрямительных устройств, имеющих более высокие технико-экономические показатели по сравнению с коллекторными генераторами постоянного тока.

Характерным признаком коллекторных машин является наличие у них коллектора — механического преобразователя переменного тока в постоянный, и наоборот. Необходимость в таком преобразователе объясняется тем, что в обмотке якоря коллекторной машины должен протекать переменный ток, так как только в этом случае в машине происходит непрерывный процесс электромеханического преобразования энергии.

Рассмотрим принцип действия коллекторного генератора постоянного тока. На рис. 4.1 изображена упрощенная модель такого генератора: между полюсами N и S постоянного магнита находится вращающаяся часть генератора — якорь, вал которого посредством шкива и ременной передачи механически связан с приводным двигателем (на рисунке не показан) — источником механической энергии. В двух продольных пазах на сердечнике якоря расположена обмотка в виде одного витка $abcd$, концы которого присоединены к двум медным изолированным друг от друга полукольцам, образующим простейший коллектор. На поверхность

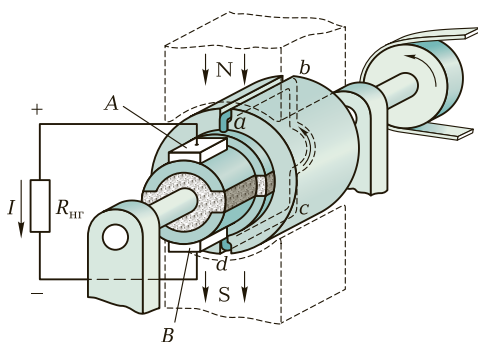


Рис. 4.1. Упрощенная модель коллекторного генератора постоянного тока

коллектора наложены щетки A и B , осуществляющие скользящий контакт с коллектором и связывающие генератор с внешней цепью, куда включена нагрузка сопротивлением $R_{\text{нп}}$.

Предположим, что приводной двигатель вращает якорь генератора против часовой стрелки, тогда в витке на якоре, вращающемся в магнитном поле постоянного магнита, наводится ЭДС, мгновенное значение которой

$$e = 2Blv,$$

а направление для положения якоря, изображенного на рис. 4.1, указано стрелками.

В процессе работы генератора якорь вращается и виток $abcd$ занимает разное пространственное положение, поэтому *в обмотке якоря наводится переменная ЭДС*. Если бы в машине не было коллектора, то ток во внешней цепи (в нагрузке $R_{\text{нп}}$) был бы переменным, но посредством коллектора и щеток переменный ток обмотки якоря преобразуется в пульсирующий ток во внешней цепи генератора, т. е. ток, неизменный по направлению. При положении витка якоря, показанном на рис. 4.1, ток во внешней цепи (в нагрузке) направлен от щетки A к щетке B . Известно, что ток во внешнем участке электрической цепи направлен от «плюса» к «минусу», поэтому нетрудно определить, что щетка A является положительной, а щетка B — отрицательной. После поворота якоря на 180° (рис. 4.2, *а*) направление тока в витке якоря изменится на обратное, так как проводники 1 и 2 поменяются местами. Однако полярность щеток, а следовательно, и направление тока во внешней цепи (в нагрузке) останутся неизменными (рис. 4.2, *б*). Объясняется это тем, что в тот момент, когда ток в витке якоря меняет свое направление, происходит смена коллекторных пластин под щетками. Таким образом, под щеткой A всегда находится пластина, соединенная с проводником, расположенным под северным магнитным полюсом N , а под щеткой B — пластина, соединенная с проводником, расположенным под южным полюсом S . Благодаря этому полярность щеток генератора остается неизменной независимо от пространственного положения витка якоря. Что же касается пульсаций тока во внешней цепи, то они намного ослабляются при увеличении числа витков в обмотке якоря при их равномерном распределении по поверхности якоря и соответствующем увеличении числа пластин в коллекторе.

В соответствии с принципом обратимости электрических машин упрощенная модель машины постоянного тока может быть использована для двигателя постоянного тока. Для этого необхо-

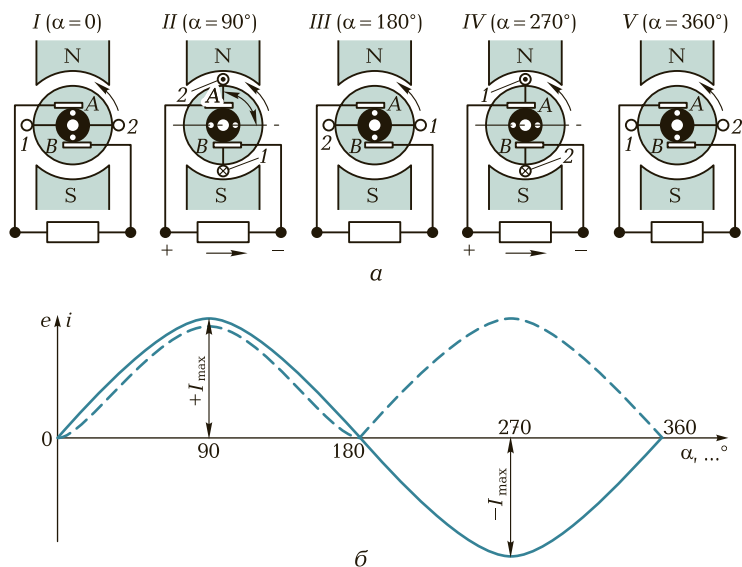
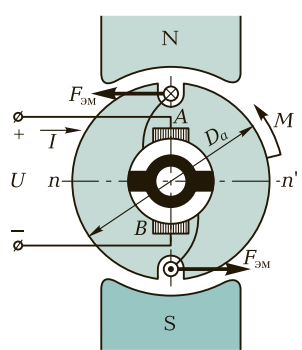


Рис. 4.2. К принципу действия генератора постоянного тока (а и б):
 — ЭДС и ток в обмотке якоря; - - - - то же, во внешней цепи генератора

димом отключить нагрузку генератора $R_{нп}$ и подвести к щеткам машины напряжение от источника постоянного тока. Например, если к щетке А подключить зажим «плюс», а к щетке В — «минус», то в обмотке якоря появится ток I , направление которого показано на рис. 4.3. В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем постоянного магнита (полем возбуждения) появятся электромагнитные силы $F_{эм}$. Совокупность этих сил создает на якоре электромагнитный момент M , приводящий якорь во вращение против часовой стрелки.



После поворота якоря на 180° электромагнитные силы не изменяют своего направления, так как одновременно с переходом каждого проводника обмотки якоря из зоны одного магнитного полюса в зону другого полюса в этих проводниках меняется направление тока. Таким образом, назначе-

Рис. 4.3. К принципу действия двигателя постоянного тока

ние коллектора и щеток в двигателе постоянного тока — изменять направление тока в проводниках обмотки якоря при их переходе из зоны магнитного полюса одной полярности в зону полюса другой полярности.

Рассмотренная упрощенная модель машины постоянного тока не обеспечивает двигателю устойчивой работы, так как при прохождении проводниками обмотки якоря геометрической нейтральной $лл'$ (рис. 4.3) электромагнитные силы $F_{эм} = 0$ (магнитная индукция в середине межполюсного пространства равна нулю). Однако с увеличением числа проводников в обмотке якоря (при равномерном их распределении на поверхности якоря) и числа пластин коллектора вращение якоря двигателя становится устойчивым и равномерным.

Обобщая изложенное, отметим, что щеточно-коллекторный узел (коммутатор), выполняющий функцию преобразователя тока, является неизменным элементом машины постоянного тока. И хотя рассматриваемые машины называют машинами постоянного тока, для непрерывного процесса электромеханического преобразования энергии в обмотке якоря этих машин должен протекать переменный ток.

4.2. УСТРОЙСТВО КОЛЛЕКТОРНОЙ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В настоящее время электромашиностроительные заводы изготавливают электрические машины постоянного тока, предназначенные для работы в самых различных отраслях промышленности, поэтому отдельные узлы этих машин могут иметь разную конструкцию, но общая конструктивная схема машин одинакова. неподвижную часть машины постоянного тока называют статором, вращающуюся часть — якорем (рис. 4.4).

Статор состоит из станины $б$ и главных полюсов 4 . Станина служит для крепления полюсов и подшипниковых щитов и является частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины. Станину изготавливают из стали — материала, обладающего достаточной механической прочностью и большой магнитной проницаемостью. В нижней части станины имеются лапы 11 для крепления машины к фундаментной плите, а по окружности станины расположены отверстия для крепления сердечников главных полюсов 4 . Обычно станину делают цельной из стальной трубы либо сварной из листовой стали, за исключением

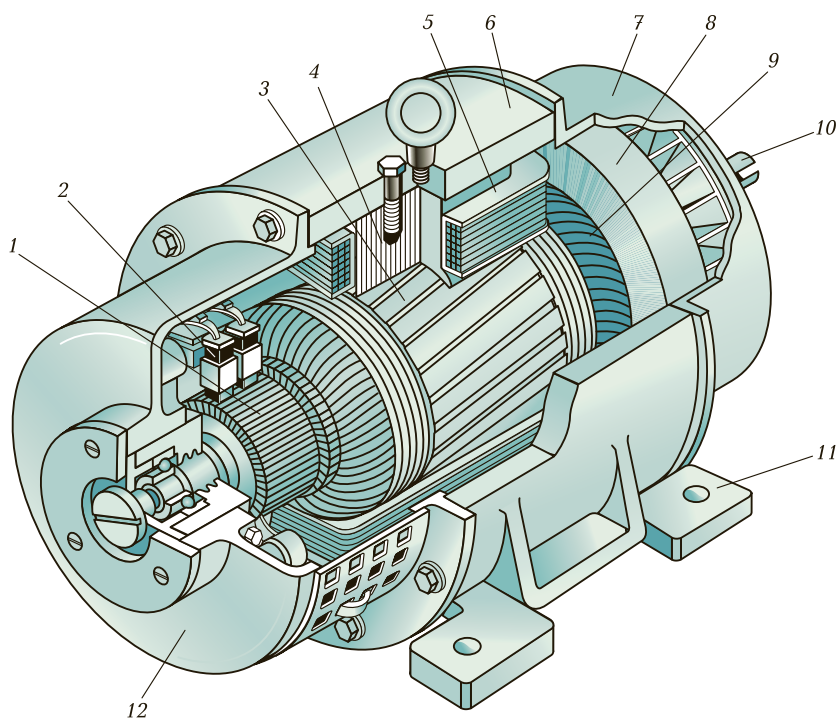


Рис. 4.4. Устройство машины постоянного тока:

1 — коллектор; 2 — щетки; 3 — сердечник якоря; 4 — сердечник полюса; 5 — катушка возбуждения; 6 — станина; 7 и 12 — подшипниковые щиты; 8 — вентилятор; 9 — обмотка якоря; 10 — вал; 11 — лапа

машин с весьма большим наружным диаметром, у которых станину делают разъемной, что облегчает транспортировку и монтаж машины в месте ее установки.

Главные полюсы предназначены для создания в машине магнитного поля возбуждения. Главный полюс состоит из сердечника 4 и полюсной катушки 5. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник полюса имеет полюсный наконечник, который обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в зазоре машины. Сердечники главных полюсов делают шихтованными из листовой конструкционной стали толщиной 1—2 мм или из тонколистовой электротехнической анизотропной холоднокатаной стали, например, марки 3411. Штампованные пластины главных полюсов специально не изолируют, так как тонкая пленка оксида на их поверхности достаточна для значительного ослабления вих-

ревых токов, наводимых в полюсных наконечниках, за счет пульсаций магнитного потока, вызванных зубчатостью сердечника якоря. Анизотропная сталь обладает повышенной магнитной проницаемостью вдоль проката, что должно учитываться при штамповке пластин и их сборке в пакет.

Якорь машины постоянного тока (рис. 4.4) состоит из вала 10, сердечника 3 с обмоткой и коллектора 1. Сердечник якоря имеет шихтованную конструкцию и набирается из штампованных пластин тонколистовой электротехнической стали. Листы покрывают изоляционным лаком, собирают в пакет и запекают. Готовый сердечник напрессовывают на вал якоря. Такая конструкция сердечника якоря позволяет значительно ослабить в нем вихревые токи, возникающие в результате его перемагничивания в процессе вращения в магнитном поле. На поверхности сердечника якоря имеются продольные пазы, в которые укладывают обмотку якоря.

Обмотку выполняют из медного провода круглого или прямоугольного сечения. Пазы якоря после заполнения их проводами обмотки обычно закрывают клиньями (текстолитовыми или гетинаксовыми). В некоторых машинах пазы не закрывают клиньями, а накладывают на поверхность якоря бандаж из проволоки или стеклоленты с предварительным натягом. Лобовые части 9 обмотки якоря крепят к обмоткодержателям бандажом.

Коллектор 1 является одним из сложных узлов машины постоянного тока. Основными элементами коллектора являются пластины трапецеидального сечения из твердотянутой меди, собранные таким образом, что коллектор приобретает цилиндрическую форму. В зависимости от способа закрепления коллекторных пластин различают два основных типа коллекторов: со стальными конусными шайбами и на пластмассе.

Помимо указанных частей машина постоянного тока имеет два подшипниковых щита: передний 12 (со стороны коллектора) и задний 7 (рис. 4.4). В центральной части щита имеется расточка под подшипник. На переднем подшипниковом щите имеется смотровое окно (люк) с крышкой, через которое можно осмотреть коллектор и щетки, не разбирая машины. Концы обмоток выведены на зажимы коробки выводов. Вентилятор 8 служит для самовентиляции машины: воздух поступает в машину обычно со стороны коллектора, омывает нагретые части (коллектор, обмотки и сердечники) и выбрасывается с противоположной стороны через решетку.

Из рассмотрения принципа действия и устройства коллекторной машины постоянного тока следует, что неизменным элемен-

том этой машины, включенным между обмоткой якоря и внешней сетью, является щеточно-коллекторный узел — механический преобразователь рода тока. Таким образом, коллекторные машины сложнее бесколлекторных машин переменного тока (асинхронной и синхронной) и, следовательно, уступают им (особенно асинхронной машине) в надежности и имеют более высокую стоимость.

4.3. СВОЙСТВА И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основные понятия. В процессе работы генератора постоянно тока в обмотке якоря индуцируется ЭДС E_a . При подключении к генератору нагрузки в цепи якоря возникает ток, а на выводах генератора устанавливается напряжение, определяемое уравнением напряжений для цепи якоря генератора:

$$U = E_a - I_a \sum r. \quad (4.1)$$

Здесь

$$\sum r = r_a + r_{\Delta} + r_{к.о} + r_c + r_{щ} \quad (4.2)$$

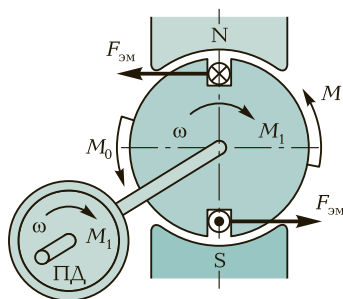
— сумма сопротивлений всех участков цепи якоря: обмотки якоря r_a , обмотки добавочных полюсов r_{Δ} , компенсационной обмотки $r_{к.о}$, последовательной обмотки возбуждения r_c и переходного щеточного контакта $r_{щ}$.

При отсутствии в машине какой-либо из указанных обмоток в (4.2) соответствующие слагаемые опускают.

Якорь генератора приводится во вращение приводным двигателем, который создает на валу генератора вращающий момент M_1 . Если генератор работает в режиме холостого хода ($I_a = 0$), то для вращения его якоря нужен сравнительно небольшой момент холостого хода M_0 . Этот момент обусловлен тормозными противодействующими моментами, возникающими в генераторе при его работе в режиме холостого хода: моментами от сил трения и вихревых токов в якоре.

При работе нагруженного генератора в проводах обмотки якоря появляется ток I_a , который, взаимодействуя с магнитным потоком возбуждения Φ , создает на якоре электромагнитный момент M . В генераторе этот момент направлен встречно вращающему моменту M_1 приводного двигателя ПД (рис. 4.5), т. е. он является нагрузочным (тормозящим).

Рис. 4.5. Моменты, действующие в генераторе постоянного тока



При неизменной частоте вращения ($n = \text{const}$) вращающий момент приводного двигателя M_1 уравнивается суммой противодействующих моментов:

$$M_1 = M_0 + M. \quad (4.3)$$

Выражение (4.3) представляет собой *уравнение моментов для генератора* при $n = \text{const}$. Умножив члены уравнения (4.3) на угловую скорость вращения якоря ω , получим уравнение мощностей:

$$P_1 = P_0 + P_{эм}, \quad (4.4)$$

где $P_1 = M_1\omega$ — подводимая от приводного двигателя к генератору мощность (механическая); $P_0 = M_0\omega$ — мощность холостого хода, т. е. мощность, подводимая к генератору в режиме холостого хода (при отключенной нагрузке); $P_{эм} = M\omega = E_a I_a$ — электромагнитная мощность генератора.

С учетом (4.1)

$$P_{эм} = UI_a + I_a^2 \sum r = P_2 + P_{за}, \quad (4.5)$$

где P_2 — полезная мощность генератора (электрическая), т. е. мощность, отдаваемая генератором нагрузке; $P_{за}$ — мощность потерь на нагрев обмоток и щеточного контакта в цепи якоря.

Учитывая потери на возбуждение генератора $P_{э.в.}$, получим уравнение мощностей для генератора постоянного тока:

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{за} + P_{э.в.} \quad (4.6)$$

Следовательно, *механическая мощность, развиваемая приводным двигателем P_1 , преобразуется в генераторе в полезную электрическую мощность P_2 , передаваемую нагрузке, и мощность, затрачиваемую на покрытие потерь ($P_0 + P_{за} + P_{э.в.}$).*

Для работы электрической машины необходимо наличие магнитного поля возбуждения. В большинстве машин постоянного

тока это поле создается обмоткой возбуждения, питаемой постоянным током. Свойства машин постоянного тока в значительной степени определяются схемой включения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря, т. е. **способом возбуждения**.

По способам возбуждения машины постоянного тока можно классифицировать следующим образом:

- *машины независимого возбуждения*, в которых обмотка возбуждения (ОВ) питается постоянным током от источника, электрически не связанного с обмоткой якоря (рис. 4.6, а);
- *машины параллельного возбуждения*, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены параллельно (рис. 4.6, б);
- *машины последовательного возбуждения* (обычно применяемые в качестве двигателей), в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно (рис. 4.6, в);
- *машины смешанного возбуждения*, в которых имеются две обмотки возбуждения — параллельная ОВ1 и последовательная ОВ2 (рис. 4.6, г);
- *машины с возбуждением постоянными магнитами* (рис. 4.6, г).

Все указанные машины (кроме последних) относятся к машинам с **электромагнитным возбуждением**, так как магнитное поле в них создается электрическим током, проходящим в обмотке возбуждения.

Начала и концы обмоток машин постоянного тока обозначаются: обмотка якоря — Я1 и Я2, обмотка добавочных полюсов — Д1 и Д2, компенсационная обмотка — К1 и К2, обмотка возбуждения независимая — М1 и М2, обмотка возбуждения параллельная (шунтовая) — Ш1 и Ш2, обмотка возбуждения последовательная (сериесная) — С1 и С2.

Так как генераторы обычно работают при неизменной частоте вращения, то их характеристики рассматривают при условии

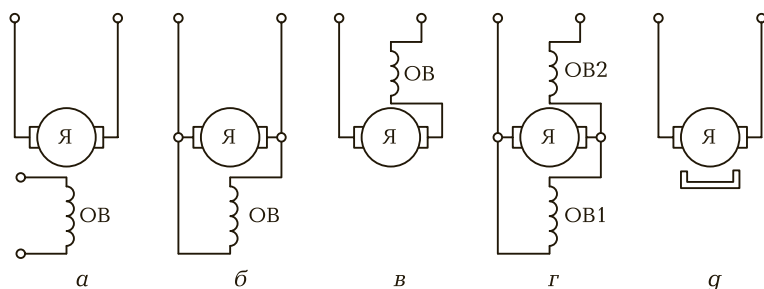


Рис. 4.6. Способы возбуждения (а...г) машин постоянного тока

$n = \text{const}$. Рассмотрим основные характеристики генераторов постоянного тока.

Характеристика холостого хода — зависимость напряжения на выходе генератора в режиме холостого хода U_0 от тока возбуждения I_B :

$$U_0 = f(I_B) \text{ при } I = 0 \text{ и } n = \text{const}.$$

Нагрузочная характеристика — зависимость напряжения на выходе генератора U при работе с нагрузкой от тока возбуждения I_B :

$$U = f(I_B) \text{ при } I \neq 0 \text{ и } n = \text{const}.$$

Внешняя характеристика — зависимость напряжения на выходе генератора U от тока нагрузки I :

$$U = f(I) \text{ при } r_{\text{рг}} = \text{const} \text{ и } n = \text{const},$$

где $r_{\text{рг}}$ — регулировочное сопротивление в цепи обмотки возбуждения.

Регулировочная характеристика — зависимость тока возбуждения I_B от тока нагрузки I при неизменном напряжении на выходе генератора:

$$I_B = f(I) \text{ при } U = \text{const} \text{ и } n = \text{const}.$$

Генератор независимого возбуждения. Схема включения генератора независимого возбуждения показана на рис. 4.7, а. Реостат $r_{\text{рг}}$, включенный в цепь возбуждения, дает возможность регулировать ток I_B в обмотке возбуждения, а следовательно, и основной магнитный поток машины. Обмотка возбуждения питается от источника постоянного тока: аккумулятора, выпрямителя или же другого генератора постоянного тока, называемого в этом случае *возбудителем*.

Характеристика холостого хода. При снятии характеристики $U_0 = f(I_B)$ генератор работает в режиме холостого хода ($I_a = 0$). Установив номинальную частоту вращения и поддерживая ее неизменной, посредством переменного резистора $r_{\text{рг}}$ постепенно увеличивают ток в обмотке возбуждения I_B от нулевого значения до $+I_B = 0a$, при котором напряжение холостого хода $U_0 = 1,15U_{\text{ном}}$. Получают данные для построения графика 1 (рис. 4.7, б). Начальная ордината графика 1 не равна нулю, что объясняется действием небольшого магнитного потока остаточного магнетизма, сохранившегося от предыдущего намагничивания машины. Уменьшив ток возбуждения до нуля и изменив его направление, постепенно

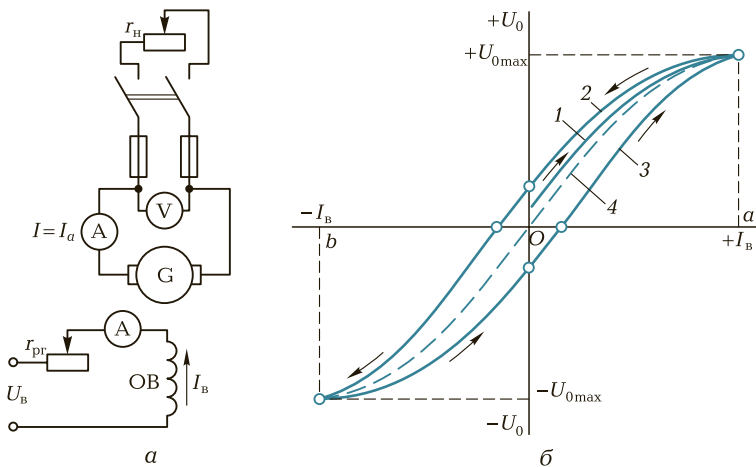


Рис. 4.7. Принципиальная схема (а) и характеристики холостого хода (б) генератора независимого возбуждения

увеличивают ток в цепи возбуждения до $-I_b = Ob$. Полученный таким образом график 2 называется *нисходящей ветвью характеристики*. В первом квадранте график 2 располагается выше графика 1. Объясняется это тем, что в процессе снятия данных графика 1 произошло усиление магнитного потока остаточного намагничивания. Далее опыт проводят в обратном направлении, т.е. уменьшают ток возбуждения от $-I_b = Ob$ до $I_b = 0$, а затем увеличивают его до значения $+I_b = Oa$. В результате получают график 3, называемый *восходящей ветвью характеристики холостого хода*. Нисходящая и восходящая ветви характеристики холостого хода образуют петлю намагничивания. Проведя между кривыми 2 и 3 среднюю линию 4, получим *расчетную характеристику холостого хода*.

Прямолинейная часть характеристики холостого хода соответствует ненасыщенной магнитной системе машины. При дальнейшем увеличении тока возбуждения сталь машины насыщается и характеристика приобретает криволинейный характер. Зависимость $U_0 = f(I_b)$ повторяет в другом масштабе магнитную характеристику машины и дает возможность судить о магнитных свойствах машины.

Нагрузочная характеристика генератора. Эта характеристика выражает зависимость напряжения U на выходе генератора от тока возбуждения I_b при неизменном токе нагрузки, например

номинальном, и частоте вращения. При указанных условиях напряжение на выводах генератора меньше ЭДС [см. (4.1)], поэтому нагрузочная характеристика располагается ниже характеристики холостого хода.

Внешняя характеристика генератора. Эта характеристика представляет собой зависимость напряжения U на выводах генератора от тока нагрузки I . При снятии данных для построения внешней характеристики генератор приводят во вращение с номинальной скоростью и нагружают его до номинального тока при номинальном напряжении. Затем, постепенно уменьшая нагрузку вплоть до холостого хода ($I = 0$), снимают показания приборов. Сопротивление цепи возбуждения R_b и частоту вращения в течение опыта поддерживают неизменными.

На рис. 4.8, а показана внешняя характеристика генератора независимого возбуждения, из которой видно, что при увеличении тока нагрузки I напряжение на выводах генератора понижается; это объясняется размагничивающим влиянием реакции якоря и падением напряжения в цепи якоря. Наклон внешней характеристики к оси абсцисс (жесткость внешней характеристики) оценивается *номинальным изменением напряжения генератора при сбросе нагрузки*:

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 \%. \quad (4.7)$$

Обычно для генератора независимого возбуждения $\Delta U_{\text{ном}} = 5 \dots 10 \%$.

Регулировочная характеристика генератора. Характеристика $I_b = f(I)$ показывает, как следует менять ток в цепи возбуждения, чтобы при изменениях нагрузки генератора напряжение на его выводах оставалось неизменным, равным номинальному. При этом частота вращения сохраняется постоянной ($n = \text{const}$). При работе генератора в режиме холостого хода в цепи возбуждения посредством резистора $r_{\text{пр}}$ устанавливают ток I_{b0} , при котором напряжение на выводах генератора становится равным номинальному. Затем постепенно увеличивают нагрузку генератора, одновременно повышают ток возбуждения таким образом, чтобы напряжение генератора во всем диапазоне нагрузок оставалось равным номинальному. Так получают восходящую ветвь характеристики (график 1 на рис. 4.8, б). Постепенно уменьшая нагрузку генератора до холостого хода и регулируя соответствующим образом ток возбуждения, получают нисходящую ветвь характеристики (график 2 на рис. 4.8, б). Нисходящая ветвь регулировочной характе-

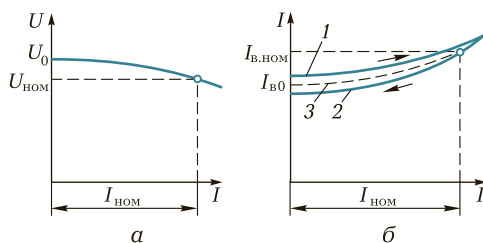


Рис. 4.8. Внешняя (а) и регулировочная (б) характеристики (1...3) генератора независимого возбуждения

ристики расположена ниже восходящей, что объясняется влиянием возросшего остаточного намагничивания магнитной цепи машины в процессе снятия восходящей ветви. Среднюю линию 3, проведенную между восходящей и нисходящей ветвями, называют *практической регулировочной характеристикой генератора*.

Основной недостаток генераторов независимого возбуждения — это необходимость в постороннем источнике постоянного тока — возбудителе. Однако возможность регулирования напряжения в широких пределах, а также сравнительно жесткая внешняя характеристика этого генератора являются его достоинствами.

Генератор параллельного возбуждения. Принцип самовозбуждения генератора постоянного тока основан на том, что магнитная система машины, будучи намагниченой, сохраняет длительное время небольшой магнитный поток остаточного магнетизма сердечников полюсов и станины $\Phi_{ост}$ (порядка 2...3 % полного потока). При вращении якоря поток $\Phi_{ост}$ индуцирует в якорной обмотке ЭДС $E_{ост}$, под действием которой в обмотке возбуждения возникает небольшой ток $I_{в.ост}$. Если МДС обмотки возбуждения имеет такое же направление, как и поток $\Phi_{ост}$, то она увеличивает поток главных полюсов. Это, в свою очередь, вызывает увеличение ЭДС генератора, отчего ток возбуждения вновь увеличится. Так будет продолжаться до тех пор, пока напряжение генератора не будет уравновешено падением напряжения в цепи возбуждения:

$$I_{в}R_{в} = U_0,$$

где $R_{в} = r_{в} + r_{рл}$ — общее сопротивление цепи возбуждения; $r_{в}$ — сопротивление обмотки возбуждения.

На рис. 4.9, а показана схема включения генератора параллельного возбуждения, на рис. 4.9, б — характеристика холостого хода

генератора (график 1) и зависимость падения напряжения от тока возбуждения $I_B R_B = f(I_B)$ (график 2). Точка пересечения A соответствует окончанию процесса самовозбуждения, так как именно в ней $I_B R_B = U_0$.

Угол наклона прямой OA к оси абсцисс определяется из треугольника OAB :

$$\frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_0}{I_B} = r_B, \quad (4.8)$$

где m_i — масштаб тока (по оси абсцисс), А/мм; m_u — масштаб напряжения (по оси ординат), В/мм.

Из (4.8) следует, что угол наклона прямой $I_B R_B = f(I_B)$ к оси абсцисс прямо пропорционален сопротивлению цепи возбуждения. Однако при некотором значении сопротивления реостата r_{pr} сопротивление r_B достигает значения, при котором зависимость $I_B R_B = f(I_B)$ становится касательной к прямолинейной части характеристики холостого хода (прямая 3). В этих условиях генератор не самовозбуждается. Сопротивление цепи возбуждения, при которой прекращается самовозбуждение генератора, называют *критическим*.

Следует отметить, что самовозбуждение генератора возможно лишь при частоте вращения, превышающей критическую $n_{кр}$. Это условие вытекает из *характеристики самовозбуждения генератора* (рис. 4.10), представляющей собой зависимость напряжения ге-

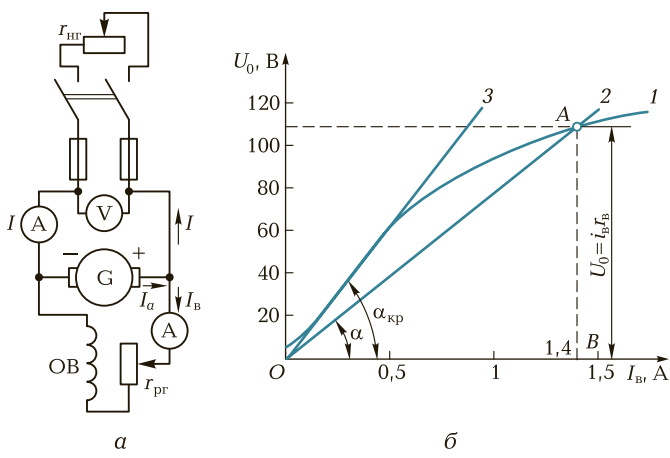


Рис. 4.9. Принципиальная схема (а) и характеристики (1...3) холостого хода (б) генератора параллельного возбуждения

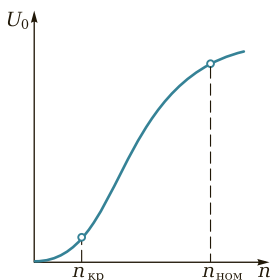


Рис. 4.10. Характеристика самовозбуждения

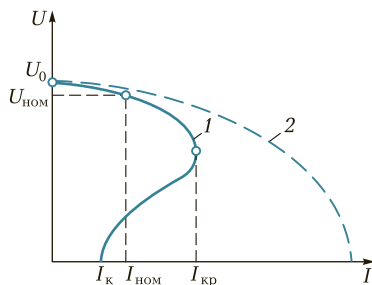


Рис. 4.11. Внешние характеристики (1 и 2) генератора параллельного возбуждения

нератора в режиме холостого хода от частоты вращения при неизменном сопротивлении цепи возбуждения, т.е. $U_0 = f(n)$ при $r_B = \text{const}$.

Анализ характеристики самовозбуждения показывает, что при $n < n_{кр}$ увеличение частоты вращения якоря генератора сопровождается незначительным увеличением напряжения, так как процесса самовозбуждения нет и появление напряжения на выходе генератора обусловлено лишь остаточным намагничиванием магнитной цепи генератора.

Процесс самовозбуждения начинается при $n > n_{кр}$. В этом случае увеличение частоты вращения сопровождается резким ростом напряжения U_0 . Однако при частоте вращения, близкой к номинальной, рост напряжения несколько замедляется, что объясняется магнитным насыщением генератора. Критическая частота вращения зависит от сопротивления цепи возбуждения и с ростом последнего увеличивается.

Таким образом, самовозбуждение генераторов постоянного тока возможно при соблюдении следующих условий:

- а) магнитная система машины должна обладать остаточным магнетизмом;
- б) присоединение обмотки возбуждения должно быть таким, чтобы МДС обмотки совпадала по направлению с потоком остаточного магнетизма $\Phi_{ост}$;
- в) сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического;
- г) частота вращения якоря должна быть больше критической.

Так как генератор параллельного возбуждения самовозбуждается лишь в одном направлении, то и характеристика холостого

хода этого генератора может быть снята только для одного квадранта осей координат.

Нагрузочная и регулировочная характеристики генератора параллельного возбуждения практически не отличаются от соответствующих характеристик генератора независимого возбуждения.

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения 1 (рис. 4.11) менее жесткая, чем у генератора независимого возбуждения. Объясняется это тем, что в генераторе параллельного возбуждения помимо причин, вызывающих уменьшение напряжения в генераторе независимого возбуждения (реакция якоря и падение напряжения в цепи якоря), действует еще и третья причина — уменьшение тока возбуждения, вызванное снижением напряжения от действия первых двух причин. Этим же объясняется и то, что при постепенном уменьшении сопротивления нагрузки $r_{н\Gamma}$ ток увеличивается лишь до критического значения $I_{кр}$, а затем при дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки ток начинает уменьшаться. Наконец, ток нагрузки при коротком замыкании $I_k < I_{кр}$. Дело в том, что с увеличением тока усиливается размагничивание генератора (усиление реакции якоря и уменьшение тока возбуждения), машина переходит в ненасыщенное состояние, при котором даже небольшое уменьшение сопротивления нагрузки вызывает резкое уменьшение ЭДС машины (см. рис. 4.9, б). Так как ток определяется напряжением на выводах генератора U и сопротивлением нагрузки $r_{н\Gamma}$, т. е. $I = U/r_{н\Gamma}$, то при токах нагрузки $I < I_{кр}$, когда напряжение генератора уменьшается медленнее, чем убывает сопротивление нагрузки, происходит рост тока нагрузки. После того как ток нагрузки I достигнет критического значения $I_{кр}$, дальнейшее уменьшение $r_{н\Gamma}$ сопровождается уменьшением тока нагрузки, так как в этом случае напряжение U убывает быстрее, чем уменьшается сопротивление нагрузки $r_{н\Gamma}$.

Таким образом, короткое замыкание, вызванное медленным уменьшением сопротивления нагрузки, не опасно для генератора параллельного возбуждения, так как генератор успевает размагнититься и ток в цепи якоря не достигает недопустимо опасных значений. Но при внезапном коротком замыкании магнитная система генератора не успевает размагнититься и ток I_k достигает опасных для машины значений $I_k = (8 \dots 12)I_{ном}$ (кривая 2). При таком резком возрастании тока нагрузки на валу генератора возникает значительный тормозящий момент, а на коллекторе появляется сильное искрение, переходящее в круговой огонь. Чтобы не допустить этого опасного явления, необходимо защищать цепь

якоря генератора плавкими предохранителями или автоматическими выключателями.

Генераторы параллельного возбуждения применяют в установках постоянного тока, так как отсутствие возбудителя выгодно отличает эти генераторы от генераторов независимого возбуждения. Номинальное изменение напряжения генератора параллельного возбуждения [см. (4.7)] составляет 10...30 %.

Генератор смешанного возбуждения. Генератор смешанного возбуждения (рис. 4.12, а) имеет параллельную и последовательную обмотки возбуждения. Поток возбуждения создается в основном параллельной обмоткой. Последовательная обмотка обычно включается согласно с параллельной (чтобы МДС обмоток складывались), что обеспечивает получение жесткой внешней характеристики генератора.

В режиме холостого хода генератор имеет только параллельное возбуждение, так как ток в последовательной обмотке возбуждения отсутствует. С появлением нагрузки возникает МДС последовательной обмотки возбуждения, которая, подмагничивая машину, компенсирует размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в якоре.

Внешняя характеристика в этом случае становится наиболее жесткой (рис. 4.12, б, график 2), т. е. напряжение на зажимах генератора при увеличении тока нагрузки остается почти неизмен-

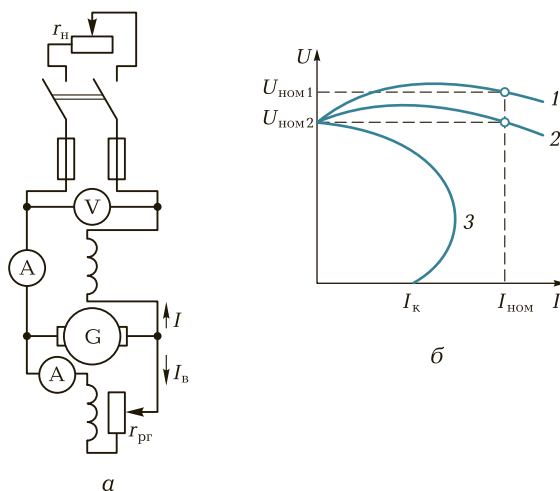


Рис. 4.12. Схема включения генератора смешанного возбуждения (а) и его внешние (б) характеристики (1...3)

ным. Если же требуется, чтобы напряжение на *зажимах потребителя* (в конце линии) оставалось практически неизменным, то число витков последовательной обмотки увеличивают так, чтобы МДС этой обмотки компенсировала еще и падение напряжения в проводах линии (график 1).

При *встречном* включении обмоток возбуждения напряжение генератора с ростом тока нагрузки резко уменьшается (график 3), что объясняется размагничивающим действием последовательной обмотки возбуждения, МДС которой направлена против МДС параллельной обмотки. Встречное включение обмоток применяют лишь в генераторах специального назначения, например в сварочных, где необходимо получить круто падающую внешнюю характеристику.

Генераторы смешанного возбуждения с согласным включением обмоток возбуждения применяют для питания силовой нагрузки в случаях, когда требуется постоянство напряжения в линии.

4.4. СВОЙСТВА И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Коллекторные машины, обладая свойством обратимости, могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Поэтому если машину постоянного тока подключить к источнику постоянного тока, то в обмотке возбуждения и в обмотке якоря машины появятся токи. Взаимодействие тока якоря I_a с магнитным полем возбуждения Φ создаст на якоре электромагнитный момент

$$M = c_m I_a \Phi,$$

который будет не тормозящим, как это имело место в генераторе, а *вращающим*. Под действием электромагнитного момента M якорь машины начнет вращаться, т. е. машина будет работать в режиме двигателя, потребляя из сети электрическую энергию и преобразуя ее в механическую. В процессе работы двигателя его якорь вращается в магнитном поле, при этом в обмотке якоря индуцируется ЭДС E_a , направление которой можно определить по правилу «правой руки». По своей природе она не отличается от ЭДС, наводимой в обмотке якоря генератора. В двигателе же ЭДС направлена против тока якоря I_a и поэтому ее называют *противоэлектродвижущей силой* (противоЭДС) якоря (рис. 4.13).

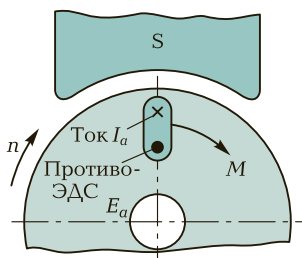


Рис. 4.13. Направление противоЭДС в обмотке якоря двигателя

Для двигателя, работающего с постоянной частотой вращения,

$$U = E_a + I_a \sum r. \quad (4.9)$$

Из (4.9) следует, что подведенное к двигателю напряжение уравнивается противоЭДС обмотки якоря и падением напряжения в цепи якоря. На основании (4.9) ток якоря

$$I_a = (U - E_a) / \sum r. \quad (4.10)$$

Умножив обе части уравнения (4.9) на ток якоря I_a , получим уравнение мощности для цепи якоря двигателя постоянного тока:

$$UI_a = I_a^2 \sum r + E_a I_a, \quad (4.11)$$

где UI_a — мощность в цепи обмотки якоря; $I_a^2 \sum r$ — мощность электрических потерь в цепи якоря.

Для выяснения сущности выражения $E_a I_a$ сделаем следующее преобразование:

$$E_a I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\omega}{2\pi} I_a,$$

или

$$E_a I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \omega = c_m \Phi I_a \omega = M\omega.$$

Окончательно получим

$$E_a I_a = M\omega = P_{эм}, \quad (4.12)$$

где $\omega = 2\pi n / 60$ — угловая скорость вращения якоря; $P_{эм}$ — электромагнитная мощность двигателя.

Следовательно, выражение $E_a I_a$ представляет собой *электромагнитную мощность двигателя*.

Преобразовав выражение (4.11), с учетом (4.12) получим

$$UI_a = M\omega + I_a^2 \sum r.$$

Анализ этого уравнения показывает, что с повышением нагрузки на вал двигателя, т. е. с увеличением электромагнитного момента M , возрастает мощность в цепи обмотки якоря UI_a , т. е. мощность на входе двигателя. Но так как напряжение, подводимое к двигателю, поддерживается неизменным ($U = \text{const}$), то увеличение нагрузки двигателя сопровождается ростом тока в обмотке якоря I_a .

В соответствии с формулой ЭДС

$$E_a = c_e \Phi n,$$

частота вращения двигателя (мин^{-1})

$$n = \frac{E_a}{c_e \Phi}.$$

Подставив значение E_a из (4.9), получим

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e \Phi}, \quad (4.13)$$

т. е. частота вращения двигателя прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна магнитному потоку возбуждения.

Физически это объясняется тем, что повышение напряжения U или уменьшение потока Φ вызывает увеличение разности $(U - E_a)$, что, в свою очередь, ведет к росту тока I_a [см. (4.10)]. Вследствие этого возросший ток повышает вращающий момент, и если при этом нагрузочный момент остается неизменным, то частота вращения двигателя увеличивается.

В зависимости от схемы соединения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря двигателя постоянного тока подразделяют на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Направление вращения якоря зависит от направлений магнитного потока возбуждения Φ и тока в обмотке якоря I_a . Поэтому, изменив направление какой-либо из указанных величин, можно реверсировать двигатель, т. е. изменить направление вращения его якоря. Следует иметь в виду, что при одновременном изменении направления тока и в цепи якоря, и в обмотке возбуждения направление вращения якоря двигателя остается прежним.

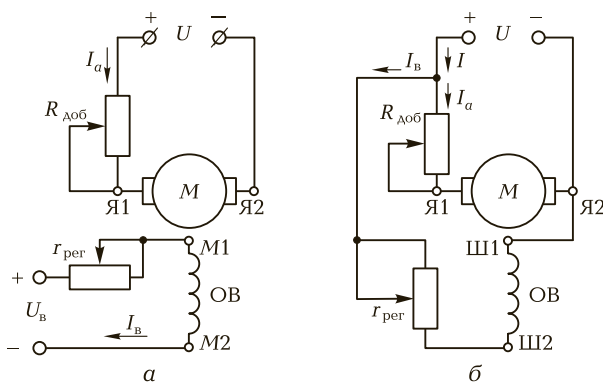


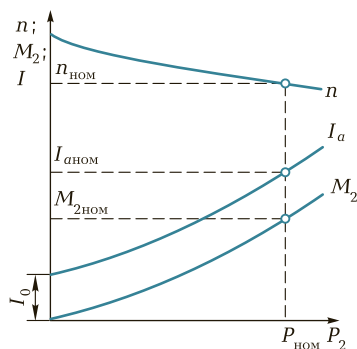
Рис. 4.14. Принципиальные схемы включения двигателей постоянного тока независимого (а) и параллельного (б) возбуждения

Двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения. Если напряжение возбуждения $U_{\text{в}}$ отличается от напряжения U , подведенного к цепи якоря, то применяют *независимое* возбуждение. В этом случае обмотка возбуждения ОВ не имеет электрической связи с обмоткой якоря (рис. 4.14, а). Если же эти напряжения равны, то применяют *параллельное* возбуждение, т. е. обмотку возбуждения ОВ подключают параллельно обмотке якоря (рис. 4.14, б). Применение в двигателе независимого или параллельного возбуждения определяется схемой электропривода. Свойства двигателей постоянного тока при независимом или параллельном возбуждении одинаковы. Эксплуатационные свойства двигателей постоянного тока определяются их рабочими и механическими характеристиками.

Рабочие характеристики. Представляют собой зависимость частоты вращения n , тока I_a в обмотке якоря, полезного момента M_2 от полезной мощности двигателя P_2 при неизменных значениях напряжения питания U и тока в обмотке возбуждения $I_{\text{в}}$ (рис. 4.15).

Характеристика $n = f(P_2)$ имеет вид кривой, наклоненной к оси абсцисс. Такая форма характеристики объясняется тем, что с ростом нагрузки двигателя P_2 увеличивается ток якоря I_a , следовательно, возрастает падение напряжения в цепи якоря $I_a \sum r$. В итоге уменьшается числитель (4.13), что ведет к снижению частоты вращения. Одновременно с ростом нагрузки усиливается реакция якоря; это уменьшает основной магнитный поток Φ , что способствует увеличению частоты вращения. В двигателях малой мощ-

Рис. 4.15. Рабочие характеристики двигателя постоянного тока независимого и параллельного возбуждения



ности с небольшим магнитным насыщением размагничивающее влияние реакции якоря невелико и характеристика $n = f(P_2)$ имеет вид кривой, слабо наклоненной к оси абсцисс. В двигателях мощностью в несколько киловатт и более реакция якоря проявляется значительно сильнее, и с ростом нагрузки в определенном диапазоне частота вращения двигателя будет возрастать и двигатель начнет работать неустойчиво. Для преодоления этого недостатка двигатели снабжаются легкой (несколько витков) *стабилизирующей* обмоткой, включенной последовательно в цепь якоря, чтобы ее МДС $F_{ст}$ была направлена согласно с МДС обмотки возбуждения F_b . При увеличении нагрузки одновременно с усилением реакции якоря увеличивается МДС стабилизирующей обмотки $F_{ст}$, которая компенсирует размагничивающее действие реакции якоря.

Характеристика момента $M_2 = f(P_2)$ определяется выражением полезного момента (момента на валу) ($\text{Н} \cdot \text{м}$):

$$M_2 = P_2 / \omega = 9,55 P_2 / n, \quad (4.14)$$

где n — частота вращения якоря, мин^{-1} .

Если $n = \text{const}$, то график $M_2 = f(P_2)$ представляет собой прямую линию, выходящую из начала осей координат. Однако с ростом нагрузки двигателя частота вращения уменьшается, что приводит к нелинейности рассматриваемой характеристики.

Характеристика тока якоря $I_a = f(P_2)$ не выходит из начала осей координат, так как в режиме холостого хода ($P_2 = 0$) двигатель потребляет из сети ток холостого хода I_0 и развивает момент холостого хода M_0 , обусловленный механическими и магнитными потерями в двигателе.

Двигатель последовательного возбуждения. В этом двигателе обмотка возбуждения включена последовательно в цепь якоря (рис. 4.16, а), поэтому магнитный поток Φ в нем зависит от тока

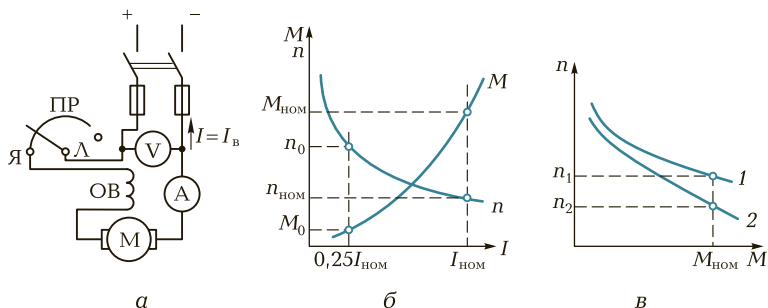


Рис. 4.16. Двигатель последовательного возбуждения:
 а — принципиальная схема; б — рабочие характеристики; в — механические характеристики; 1 — естественная характеристика; 2 — искусственная характеристика

нагрузки $I = I_a = I_b$. При небольших нагрузках магнитная система машины не насыщена и зависимость магнитного потока от тока нагрузки прямо пропорциональна, т.е. $\Phi = k_\Phi I_a$. В этом случае электромагнитный момент двигателя равен

$$M = c_m k_\Phi I_a I_a = c_m' I_a^2. \quad (4.15)$$

Формула частоты вращения (4.13) примет вид

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e k_\Phi I_a} = \frac{U - I_a \sum r}{c_e' I_a}, \quad (4.16)$$

где k_Φ — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, вращающий момент двигателя при ненасыщенном состоянии магнитной системы пропорционален квадрату тока якоря, а частота вращения обратно пропорциональна этому току.

На рис. 4.16, б показаны рабочие характеристики $M = f(I)$ и $n = f(I)$ двигателя последовательного возбуждения. С ростом нагрузки двигателя наступает насыщение магнитной системы. В этом случае магнитный поток при возрастании нагрузки практически не меняется и характеристики двигателя приобретают почти прямолинейный характер. Характеристика частоты вращения двигателя последовательного возбуждения $n = f(I)$ показывает, что частота вращения двигателя значительно изменяется при колебаниях нагрузки, особенно в зоне небольших нагрузок, когда магнитная система двигателя не насыщена. Такую характеристику принято называть *мягкой*. При уменьшении нагрузки двигателя последовательного возбуждения частота вращения резко увели-

чивается и при нагрузке менее 25 % номинальной может достигнуть опасных для двигателя значений («разнос»). Поэтому работа двигателя последовательного возбуждения или его пуск при нагрузке на валу менее 25 % номинальной недопустимы. Двигатели последовательного возбуждения нельзя применять для привода механизмов, где возможен холостой ход или небольшая нагрузка (станки, транспортеры и т.д.). Для более надежной работы вал двигателя последовательного возбуждения должен быть жестко соединен с рабочим механизмом посредством муфты или зубчатой передачи. Применение ременных передач или фрикционных муфт в механизмах, приводимых двигателями последовательного возбуждения, недопустимо, так как при обрыве или сбросе ремня или нарушении сцепления между элементами фрикционной муфты может произойти «разнос» двигателя. Учитывая возможность работы двигателя на повышенных частотах вращения, двигатели последовательного возбуждения, согласно стандарту, подвергают испытанию в течение 2 мин на превышение частоты вращения на 20 % сверх максимальной, указанной в каталоге, но не меньше чем на 50 % сверх номинальной.

Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения $n = f(M)$ показаны на рис. 4.16, в. Резко падающие графики мягких механических характеристик (естественная 1 и искусственная 2) обеспечивают двигателю последовательного возбуждения устойчивую работу при любой механической нагрузке. Свойство этих двигателей развивать большой вращающий момент, пропорциональный квадрату тока нагрузки, имеет важное значение, особенно в тяжелых условиях пуска, при перегрузках, так как с увеличением нагрузки двигателя мощность на его входе растет медленнее, чем вращающий момент. Эта особенность двигателей последовательного возбуждения является одной из причин их широкого применения в качестве тяговых двигателей на транспорте, а также в качестве крановых двигателей в подъемных установках, т.е. во всех электроприводах с тяжелыми условиями пуска и с сочетанием значительных нагрузок на вал двигателя с малой частотой вращения.

Номинальное изменение частоты вращения двигателя последовательного возбуждения

$$\Delta n_{\text{НОМ}} = \frac{n_{[0,25]} - n_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} 100 \%,$$

где $n_{[0,25]}$ — частота вращения при нагрузке двигателя, составляющей 25 % номинальной.

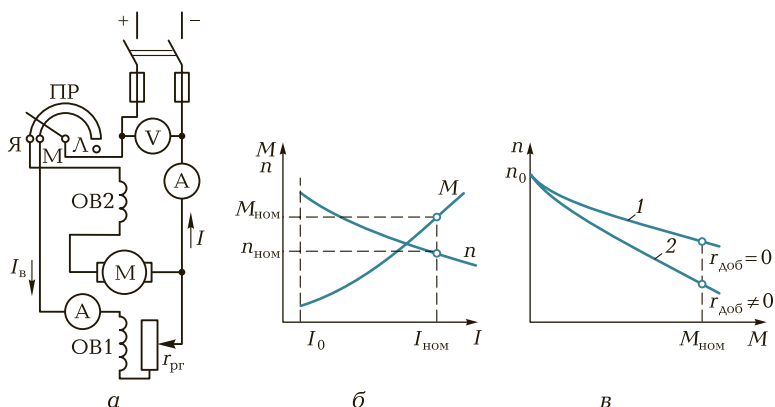


Рис. 4.17. Схема включения двигателя смешанного возбуждения (а), его рабочие (б) и механические (в) характеристики (1, 2)

Двигатель смешанного возбуждения. Двигатель смешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения: параллельную и последовательную (рис. 4.17, а). Частота вращения этого двигателя

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e (\Phi_1 \pm \Phi_2)}, \quad (4.17)$$

где Φ_1 и Φ_2 — потоки параллельной и последовательной обмоток возбуждения.

Знак плюс соответствует согласованному включению обмоток возбуждения (МДС обмоток суммируется). В этом случае с увеличением нагрузки общий магнитный поток возрастает (за счет потока последовательной обмотки Φ_2), что ведет к уменьшению частоты вращения двигателя. При встречном включении обмоток поток Φ_2 при увеличении нагрузки размагничивает машину [знак «минус» в (4.17)], что, наоборот, повышает частоту вращения. Работа двигателя при этом становится неустойчивой, так как с увеличением нагрузки двигатель размагничивается и его частота вращения неограниченно растет. Однако при небольшом числе витков последовательной обмотки с увеличением нагрузки частота вращения не возрастает, а стабилизируется и во всем диапазоне нагрузок остается практически неизменной.

На рис. 4.17, б показаны рабочие характеристики двигателя смешанного возбуждения при согласованном включении обмоток

возбуждения, а на рис. 4.17, в — механические характеристики. В отличие от механических характеристик двигателя последовательного возбуждения последние имеют более пологий вид. Эти характеристики пересекают ось ординат в точке идеального холостого хода n_0 , а следовательно, двигатели смешанного возбуждения могут работать в генераторном режиме, что используется при рекуперативном торможении.

Следует отметить, что по своей форме характеристики двигателя смешанного возбуждения занимают промежуточное положение между соответствующими характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения в зависимости от того, в какой из обмоток возбуждения (параллельной или последовательной) преобладает МДС.

Двигатель смешанного возбуждения имеет преимущества по сравнению с двигателем последовательного возбуждения. Этот двигатель может работать вхолостую, так как поток параллельной обмотки Φ_1 ограничивает частоту вращения двигателя в режиме холостого хода и устраняет опасность «разноса». Регулировать частоту вращения этого двигателя можно реостатом в цепи параллельной обмотки возбуждения. Однако наличие двух обмоток возбуждения делает двигатель смешанного возбуждения более дорогостоящим по сравнению с двигателями рассмотренных ранее типов, что несколько ограничивает его применение. Двигатели смешанного возбуждения применяют обычно там, где требуются значительные пусковые моменты, быстрое ускорение при разгоне, устойчивая работа и допустимо лишь небольшое снижение частоты вращения при увеличении нагрузки на вал (прокатные станы, грузовые подъемники, насосы, компрессоры).

4.5. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И КПД МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

В машинах постоянного тока, как и в других электрических машинах, имеют место магнитные, электрические и механические потери (составляющие группу основных потерь) и добавочные потери.

Магнитные потери. Магнитные потери P_m происходят только в сердечнике якоря, так как только этот элемент магнитопровода машины постоянного тока подвергается перемагничиванию. Величина магнитных потерь, состоящих из потерь от гистерезиса

и потерь от вихревых токов, зависит от частоты перемещения (от частоты вращения якоря), значений магнитной индукции в зубцах и спинке якоря, толщины листов электротехнической стали, ее магнитных свойств и качества изоляции этих листов в пакете якоря.

Электрические потери. Электрические потери в коллекторной машине постоянного тока обусловлены нагревом обмоток и щеточного контакта. Потери в цепи возбуждения определяются потерями в обмотке возбуждения и в реостате, включенном в цепь возбуждения:

$$P_{э.в} = U_{в} I_{в}, \quad (4.18)$$

где $U_{в}$ — напряжение на зажимах цепи возбуждения.

Потери в обмотках цепи якоря

$$P_{э.а} = I_a^2 \sum r, \quad (4.19)$$

где сопротивление обмоток в цепи якоря $\sum r$ приведено к расчетной рабочей температуре.

Электрические потери также имеют место и в контакте щеток:

$$P_{э.щ} = \Delta U_{щ} I_a, \quad (4.20)$$

где $\Delta U_{щ}$ — переходное падение напряжения, В, на щетках обеих полярностей, принимаемое в соответствии с маркой щеток.

Электрические потери в цепи якоря и в щеточном контакте зависят от нагрузки машины, поэтому эти потери называют *переменными*.

Механические потери. В машине постоянного тока механические потери складываются из потерь от трения щеток о коллектор:

$$P_{к} = k_{тр} \sum_{щ} f_{щ} v_{к}, \quad (4.21)$$

трения в подшипниках $P_{п}$ и потерь на вентиляцию $P_{вен}$:

$$P_{мех} = P_{к} + P_{п} + P_{вен}, \quad (4.22)$$

где $k_{тр}$ — коэффициент трения щеток о коллектор ($k_{тр} = 0,2 \dots 0,3$); $S_{щ}$ — поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором, м²; $f_{щ}$ — удельное давление, Н/м², щетки [для машин общего назначения $f_{щ} = (2 \dots 3) \cdot 10^4$ Н/м²];

окружная скорость коллектора (м/с) диаметром $D_{к}$, м:

$$v_{к} = \pi D_{к} n / 60. \quad (4.23)$$

Механические и магнитные потери при стабильной частоте вращения ($n = \text{const}$) можно считать постоянными.

Сумма магнитных и механических потерь составляет потери холостого хода:

$$P_0 = P_M + P_{\text{мех}}. \quad (4.24)$$

Если машина работает в качестве двигателя независимого или параллельного возбуждения в режиме холостого хода, то она потребляет из сети мощность

$$P_{10} = UI_{a0} + U_B I_B = P_M + P_{\text{мех}} + I_{a0}^2 \sum r + \Delta U_{\text{щ}} I_{a0} + U_B I_B. \quad (4.25)$$

Однако ввиду небольшого значения тока I_{a0} электрические потери $I_{a0}^2 \sum r$ и $\Delta U_{\text{щ}} I_{a0}$ весьма малы и обычно не превышают 3% потерь $P_0 = P_M + P_{\text{мех}}$. Поэтому, не допуская заметной ошибки, можно записать:

$$P_{10} = UI_{a0} + U_B I_B = P_0 + U_B I_B,$$

откуда потери холостого хода

$$P_0 = P_{10} - U_B I_B. \quad (4.26)$$

Таким образом, потери холостого хода (магнитные и механические) могут быть определены экспериментально.

В машинах постоянного тока имеется ряд трудно учитываемых потерь, называемых *добавочными*. Эти потери складываются из потерь от вихревых токов в меди обмоток, потерь в уравнивательных соединениях, в стали якоря из-за неравномерного распределения индукции при нагрузке машины, в полюсных наконечниках, обусловленных пульсацией основного потока из-за наличия зубцов якоря, и др. Добавочные потери составляют хотя и небольшую, но не поддающуюся точному учету величину. Поэтому, согласно действующему стандарту, в машинах без компенсационной обмотки величины добавочных потерь P_A принимают равными 1% полезной мощности для генераторов или 1% подводимой мощности для двигателей; в машинах с компенсационной обмоткой величины добавочных потерь принимают равными соответственно 0,5%.

Мощность, Вт, на входе машины постоянного тока (подводимая мощность):

для генератора (механическая мощность)

$$P_{\text{ген}} = M_1 \omega = 0,105 M_1 n, \quad (4.27)$$

где M_1 — вращающий момент приводного двигателя, Н · м;

для двигателя (электрическая мощность)

$$P_{1\text{ДВ}} = UI. \quad (4.28)$$

Мощность (Вт) на выходе машины (полезная мощность):
для генератора (электрическая мощность)

$$P_{2\text{ген}} = UI; \quad (4.29)$$

для двигателя (механическая мощность)

$$P_{2\text{ДВ}} = 0,105M_2n, \quad (4.30)$$

где M_2 — момент на валу якоря двигателя, Н·м; n — частота вращения якоря, мин⁻¹.

Коэффициент полезного действия. КПД электрической машины представляет собой отношение мощностей: отдаваемой (полезной) P_2 к подводимой (потребляемой) P_1 :

$$\eta = P_2/P_1.$$

Определив суммарную мощность вышеперечисленных потерь

$$\sum P = P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{э.в}} + P_{\text{э.а}} + P_{\text{э.щ}} + P_{\text{д}}, \quad (4.31)$$

можно подсчитать КПД машины по одной из следующих формул:
для генератора

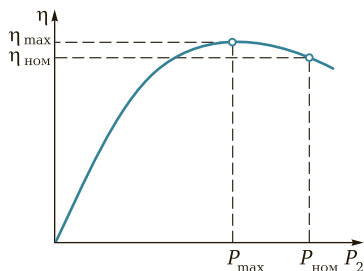
$$\eta_{\text{ген}} = \frac{P_{2\text{ген}}}{P_{1\text{ген}}} = \frac{UI}{UI + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{UI + \sum P}; \quad (4.32)$$

для двигателя

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_{2\text{ДВ}}}{P_{1\text{ДВ}}} = \frac{UI - \sum P}{UI} = 1 - \frac{\sum P}{UI}. \quad (4.33)$$

Обычно КПД машин постоянного тока составляет 0,75...0,90 для машин мощностью от 1 до 100 кВт и 0,90...0,95 для машин мощностью более 100 кВт. Намного меньше КПД машин постоянного тока малой мощности. Например, для машин мощностью от 5 до 50 Вт $\eta = 0,15...0,50$.

Указанные значения КПД соответствуют номинальной нагрузке машины. Зависимость КПД машины постоянного тока от нагрузки выражается графиком $\eta = f(P_2)$, форма которого характерна для электрических машин (рис. 4.18).

Рис. 4.18. Зависимость $\eta = f(P_2)$ 

Коэффициент полезного действия электрической машины можно определять:

а) методом непосредственной нагрузки по результатам измерений подведенной P_1 и отдаваемой P_2 мощностей;

б) косвенным методом по результатам измерений и последующих вычислений потерь.

Метод непосредственной нагрузки применим только для машин малой мощности, для остальных случаев используется косвенный метод, как более точный и удобный. Установлено, что при $\eta > 80\%$ измерять КПД методом непосредственной нагрузки нецелесообразно, так как он дает большую ошибку, чем косвенный метод.

Существует несколько косвенных способов определения КПД. Наиболее прост способ холостого хода двигателя, когда потребляемая машиной постоянного тока мощность затрачивается только на потери холостого хода [см. (4.24)]. Что же касается электрических потерь, то их определяют расчетным путем после предварительного измерения электрических сопротивлений обмоток и приведения их к рабочей температуре.

Пример 4.1. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения включен в сеть напряжением 220 В. При номинальной нагрузке и частоте вращения $n_{\text{ном}} = 1500 \text{ мин}^{-1}$ он потребляет ток $I_{\text{ном}} = 43 \text{ А}$. Определить КПД двигателя при номинальной нагрузке, если ток холостого хода $I_0 = 4 \text{ А}$, а сопротивления цепей якоря $\sum r = 0,25 \text{ Ом}$ и возбуждения $r_b = 150 \text{ Ом}$. При каком добавочном сопротивлении $r_{\text{доб}}$, включенном последовательно в цепь якоря, частота вращения двигателя будет $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ (нагрузочный момент $M_2 = \text{const}$)?

Решение. Ток возбуждения $I_b = U/r_b = 220/150 = 1,47 \text{ А}$. Ток якоря в режиме холостого хода $I_{a0} = I_0 - I_b = 4 - 1,47 = 2,53 \text{ А}$. Ток якоря номинальный $I_{\text{аном}} = I_{\text{ном}} - I_b = 43 - 1,47 = 41,53 \text{ А}$.

Сумма магнитных и механических потерь

$$P_0 = P_m + P_{\text{мех}} = UI_{a0} - I_{a0}^2 \sum r = 220 \cdot 2,53 - 2,53^2 \cdot 0,25 = 555 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в цепи возбуждения по (4.18):

$$P_{э.в} = UI_{в} = 220 \cdot 1,47 = 323,4 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в цепи якоря по (4.19):

$$P_{э.а} = I_{\text{ном}}^2 \sum r = 41,53^2 \cdot 0,25 = 431 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в щеточном контакте по (4.20):

$$P_{э.щ} = \Delta U_{щ} I_{\text{ном}} = 2 \cdot 41,53 = 83 \text{ Вт.}$$

Подводимая к двигателю мощность по (4.28):

$$P_{\text{ном}} = UI_{\text{ном}} = 220 \cdot 43 = 9\,460 \text{ Вт.}$$

Добавочные потери

$$P_{\text{доб}} = 0,01 P_{\text{ном}} = 0,01 \cdot 9\,460 = 94,6 \text{ Вт.}$$

Суммарные потери по (4.31)

$$\sum P = 555 + 323,4 + 431 + 83 + 94,6 = 1\,487 \text{ Вт.}$$

Полезная мощность двигателя

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} - \sum P = 9\,460 - 1\,487 = 7\,973 \text{ Вт.}$$

КПД двигателя при номинальной нагрузке

$$\eta_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / P_{\text{ном}} = 7\,973 / 9\,460 = 0,843.$$

Из выражения (4.13) получим

$$c_e \Phi = \frac{U - I_a \sum r}{n_{\text{ном}}} = \frac{220 - 41,53 \cdot 0,25}{1\,500} = 0,14.$$

ЭДС якоря при частоте вращения $1\,000 \text{ мин}^{-1}$:

$$E_a = c_e \Phi n = 0,14 \cdot 1\,000 = 140 \text{ В.}$$

Так как ток якоря прямо пропорционален моменту $I_a \equiv M$, то при $M = \text{const}$ сила тока I_a после включения $r_{\text{доб}}$ останется прежней $I_a = I_{\text{ном}} = 41,53 \text{ А}$. Из выражения тока якоря получим

$$r_{\text{доб}} = \frac{U - E_a}{I_a} - \sum r = \frac{220 - 140}{41,53} - 0,25 = 1,68 \text{ Ом.}$$

Электрические потери в добавочном сопротивлении

$$P_{э.доб} = I_a^2 r_{\text{доб}} = 41,53^2 \cdot 1,68 = 2\,897 \text{ Вт.}$$

Полезная мощность двигателя при частоте вращения $1\,000 \text{ мин}^{-1}$:

$$P_2 \approx P_{\text{ном}} - P_{э.доб} = 7\,973 - 2\,897 = 5\,076 \text{ Вт.}$$

Расчет полезной мощности P_2 является приближенным, так как он не учитывает уменьшение механических потерь двигателя при его переходе на меньшую частоту вращения.

4.6. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Универсальными называют коллекторные двигатели, которые могут работать как от сети постоянного, так и однофазного переменного тока.

Коллекторный двигатель постоянного тока в принципе может работать от сети переменного тока, так как при переходе от положительного полупериода переменного напряжения к отрицательному направление электромагнитного момента сохраняется неизменным. Объясняется это тем, что при переходе к отрицательному полупериоду почти одновременно с изменением направления тока в обмотке якоря меняется направление тока в обмотке возбуждения, т. е. меняется полярность полюсов.

В универсальном коллекторном двигателе стремятся получить примерно одинаковые частоты вращения при номинальной нагрузке как на постоянном, так и на переменном токах. Достигается это тем, что обмотку возбуждения двигателя выполняют с ответвлениями: при работе двигателя от сети постоянного тока обмотка возбуждения используется полностью, а при работе от сети переменного тока — частично (рис. 4.19, а).

Расхождения в характеристиках двигателя на постоянном и переменном токе объясняются тем, что при работе от сети перемен-

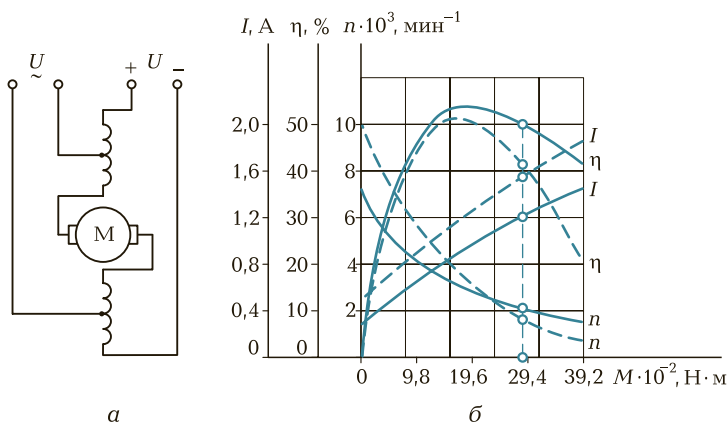


Рис. 4.19. Схема соединений (а) и рабочие характеристики (б) универсального коллекторного двигателя:

— постоянный ток; - - - переменный ток

ного тока на величину и фазу тока оказывают влияние индуктивные сопротивления обмоток якоря и возбуждения. Однако уменьшение числа витков обмотки возбуждения обеспечивает сближение характеристик лишь при нагрузке, близкой к номинальной. На рис. 4.19, б показаны рабочие характеристики универсального коллекторного двигателя типа УМТ-22 (55 Вт, 2 000 мин⁻¹, 110/127 В). Номинальное значение момента этого двигателя

$$M_{\text{ном}} = 9,55P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 55/2\,000 = 0,26 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Потребляемый двигателем ток при работе от сети переменного тока больше, чем при работе этого же электродвигателя от сети постоянного тока, так как переменный ток помимо активной имеет еще и реактивную составляющую. КПД универсальных двигателей при переменном токе ниже, чем при постоянном, что вызвано повышенными магнитными потерями.

Наряду с универсальными промышленностью изготавливаются коллекторные двигатели переменного тока, предназначенные для работы только от сети переменного тока. В отличие от однофазных асинхронных двигателей такие двигатели способны создавать более значительные вращающие моменты, а их частота вращения может намного превышать 3 000 мин⁻¹ (при частоте переменного тока 50 Гц это невозможно в асинхронных двигателях). Благодаря этим свойствам однофазные коллекторные двигатели получили широкое применение в электроинструменте (электродрели, электропилы, электрорубанки) и бытовых приборах (пылесосы, кофемолки, миксеры). Однако следует помнить, что этим двигателям присущи недостатки, обусловленные наличием коллектора, — пожаро- и взрывоопасность, радиопомехи, необходимость в уходе за состоянием коллектора и щеток.

4.7. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Тахогенератор постоянного тока. Тахогенераторы постоянного тока служат для измерения частоты вращения по величине напряжения на выходе тахогенератора, а также для получения электрических сигналов, пропорциональных частоте вращения вала в схемах автоматического регулирования. Тахогенератор постоянного тока представляет собой генератор малой мощности с независимым электромагнитным возбуждением (рис. 4.20, а) или с возбуждением постоянными магнитами.

Ввиду того что при неизменном токе возбуждения $I_B = \text{const}$ магнитный поток Φ практически не зависит от нагрузки, выходная ЭДС тахогенератора $E_{\text{вых}}$ прямо пропорциональна частоте вращения:

$$E_{\text{вых}} = c_e \Phi n = c'_e n, \quad (4.34)$$

где

$$c'_e = c_e \Phi = \text{const.}$$

Формула (4.34) справедлива и для тахогенератора с возбуждением постоянными магнитами, где $\Phi = \text{const}$. Для измерения частоты вращения тахогенератором вал последнего механически соединяют с валом механизма, частоту вращения которого требуется измерить. На выводы тахогенератора подключают измерительный прибор со шкалой, градуированной в единицах частоты вращения (мин^{-1}).

Точность работы тахогенератора определяется его *выходной характеристикой*, представляющей собой зависимость напряжения на выходе от частоты вращения — при неизменном значении сопротивления нагрузки. Наиболее точная работа тахогенератора соответствует прямолинейной выходной характеристике (рис. 4.20, б, график 1).

Однако в реальных тахогенераторах выходная характеристика не прямолинейна (график 2) и к тому же она выходит не из начала осей координат. Основная причина криволинейности характеристики — реакция якоря, поэтому уменьшению криволинейности этой характеристики способствует включение на выход тахогенератора приборов с большим внутренним сопротивлением, так как при уменьшении тока якоря ослабляется действие реакции якоря.

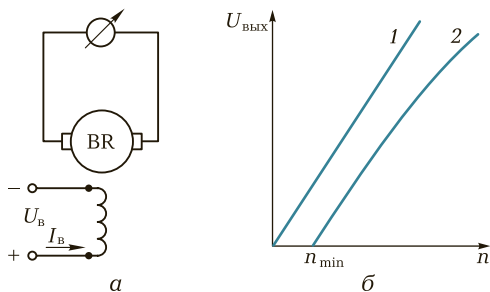


Рис. 4.20. Принципиальная схема (а) и выходные характеристики (1 и 2) тахогенератора постоянного тока (б)

В современных тахогенераторах отклонение выходной характеристики от прямолинейной составляет от 0,5 до 3 %.

Падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{щ}$ создает в тахогенераторе зону *нечувствительности*. Это диапазон частот вращения от 0 до n_{\min} , в котором напряжение на выходе генератора равно нулю.

Граница зоны нечувствительности определяется выражением

$$n_{\min} = \Delta U_{щ} / (c_e \Phi). \quad (4.35)$$

Широкое применение получили тахогенераторы постоянного тока, возбуждаемые постоянными магнитами. Эти тахогенераторы не имеют обмотки возбуждения, и поэтому они проще по конструкции и имеют меньшие габариты.

Исполнительные двигатели постоянного тока. Исполнительные двигатели постоянного тока, так же как исполнительные асинхронные двигатели, применяются в системах автоматики для преобразования электрического сигнала в механическое перемещение. К исполнительным двигателям предъявляется ряд специфических требований, из которых основными являются отсутствие самохода и малоинерционность. Почти все исполнительные двигатели (исключение составляют лишь двигатели с постоянными магнитами) имеют две обмотки. Одна из них постоянно подключена к сети и называется **обмоткой возбуждения**, а на другую — **обмотку управления** — электрический сигнал подается, когда необходимо привести двигатель во вращение. От величины напряжения управления зависят частота вращения и вращающий момент исполнительного двигателя, а следовательно, и развиваемая им механическая мощность.

Исполнительные двигатели постоянного тока по конструкции отличаются от двигателей постоянного тока общего назначения только тем, что имеют шихтованные (набранные из листов электротехнической стали) якорь, станину и полюса, что необходимо для работы исполнительных двигателей в переходных режимах. Магнитная цепь исполнительных двигателей не насыщена, поэтому реакция якоря практически не влияет на их рабочие характеристики.

В качестве исполнительных двигателей постоянного тока в настоящее время применяют чаще всего двигатели с независимым возбуждением, реже — двигатели с постоянными магнитами. У двигателей с независимым возбуждением в качестве обмотки управления используют либо обмотку якоря — двигатели с якор-

ным управлением, либо обмотку полюсов — двигатели с полюсным управлением.

У исполнительных двигателей с якорным управлением обмоткой возбуждения является обмотка полюсов, а обмоткой управления — обмотка якоря (рис. 4.21, а). Обмотку возбуждения подключают к сети с постоянным напряжением U_B на все время работы автоматического устройства. На обмотку управления подают сигнал (напряжение управления) лишь тогда, когда необходимо вызвать вращение якоря двигателя. От напряжения управления зависят вращающий момент и частота вращения двигателя. При изменении полярности напряжения управления меняется направление вращения якоря двигателя.

У исполнительных двигателей с полюсным управлением обмоткой управления является обмотка полюсов, а обмоткой возбуждения — обмотка якоря (рис. 4.21, б). Якорь двигателя постоянно подключен к сети напряжением $U_B = \text{const}$. Для ограничения тока иногда последовательно с якорем включают добавочный резистор сопротивлением R_A . На обмотку полюсов напряжение управления U_Y (сигнал) подают, когда необходимо вызвать вращение якоря.

Исполнительные двигатели постоянного тока обычной конструкции имеют существенный недостаток — замедленность переходных процессов, т. е. отсутствие малоинерционности. Объясняется это в основном двумя причинами:

1) наличием массивного якоря со стальным сердечником, обладающим большим моментом инерции J_2 ; эта причина вызывает увеличение электромеханической постоянной времени $T_{эм} \approx 0,105J_2n_0/M_{пуск}$;

2) значительной индуктивностью обмотки якоря $L_{я}$, активные стороны которой уложены в пазы сердечника якоря; эта причина

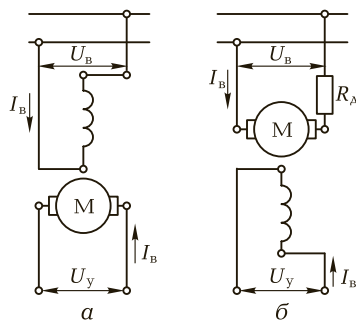


Рис. 4.21. Схемы (а и б) включения исполнительных двигателей постоянного тока

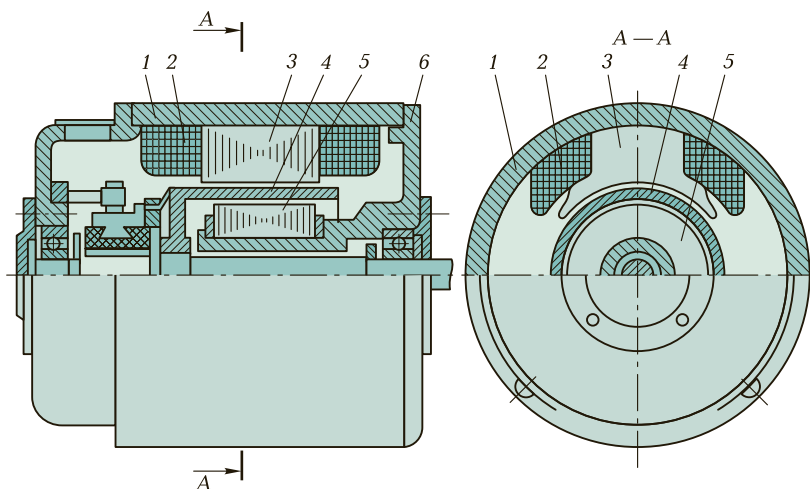


Рис. 4.22. Малоинерционный исполнительный двигатель постоянного тока с полым якорем:

1 — станина; 2 — обмотка возбуждения; 3 — полюс; 4 — якорь; 5 — статор; 6 — щит

способствует увеличению электромагнитной постоянной времени $T = L_a / \sum r$.

Указанные недостатки отсутствуют в двигателях с гладким (полым) якорем (рис. 4.22). Станина 1 и полюса 3 этого двигателя обычные. Возбуждение двигателя осуществляется либо с помощью обмотки возбуждения 2, либо постоянными магнитами.

Для уменьшения момента инерции якоря его обмотка отделена от массивного ферромагнитного сердечника, последний выполнен неподвижным (внутренний статор 5) и расположен на цилиндрическом выступе подшипникового щита 6.

Обмотка якоря в процессе изготовления укладывается на цилиндрический каркас, а затем заливается пластмассой. Готовый якорь 4 представляет собой полый стакан, состоящий из проводников обмотки, связанных воедино пластмассой. Концы секций обмотки, как и в обычном двигателе, соединяются с пластинами коллектора, который является частью дна полого стакана якоря 4. Вращающийся узел двигателя с гладким якорем состоит из вала, коллектора и обмотки якоря, залитой пластмассой.

Момент инерции полого якоря значительно меньше момента инерции обычного якоря, что обеспечивает хорошее быстродействие двигателя. Кроме того, индуктивность обмотки якоря сни-

жается, что также способствует повышению быстродействия двигателя. К тому же снижение индуктивности обмотки улучшает коммутацию двигателя за счет уменьшения реактивной ЭДС.

Недостаток рассмотренного малоинерционного двигателя с полым якорем — наличие большого немагнитного промежутка между полюсами статора и неподвижным ферромагнитным сердечником — внутренним статором. Этот промежуток складывается из двух воздушных зазоров и толщины стакана якоря (толщины слоя обмотки якоря). Наличие большого немагнитного промежутка на пути магнитного потока требует значительного увеличения МДС возбуждения, что приводит, во-первых, к увеличению габаритов двигателя из-за увеличения объема обмотки возбуждения, а во-вторых, к росту потерь на нагрев обмотки возбуждения. Однако КПД двигателя с полым якорем вследствие отсутствия потерь в стали сердечника якоря практически находится на том же уровне, что и в обычных двигателях, а в случае применения для возбуждения постоянных магнитов значительно превосходит КПД последних.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение коллектора в генераторе и двигателе?
2. Почему станину машины постоянного тока делают из стали?
3. Какие характеристики определяют свойства генераторов постоянного тока?
4. Почему у генератора параллельного возбуждения изменение напряжения при сбросе нагрузки больше, чем у генератора независимого возбуждения?
5. Каковы условия самовозбуждения генераторов постоянного тока?
6. При каком включении обмоток возбуждения генератора смешанного возбуждения напряжение на зажимах потребителя сохраняется практически неизменным?
7. Сравните двигатели параллельного и последовательного возбуждения по их регулировочным свойствам.
8. Какова разница в конструкции коллекторных двигателей постоянного и переменного тока?
9. Объясните принцип якорного и полюсного способов управления исполнительными двигателями.
10. Каковы достоинства и недостатки малоинерционного двигателя постоянного тока?

II

РАЗДЕЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

- Глава 5. Механика электропривода
- Глава 6. Регулирование координат электропривода
- Глава 7. Электроприводы с двигателями постоянного тока
- Глава 8. Электроприводы с асинхронным двигателем
- Глава 9. Электроприводы с синхронными двигателями
- Глава 10. Энергетика электропривода
- Глава 11. Выбор и проверка двигателей
- Глава 12. Электроприводы специального назначения и исполнения

5.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

В современном промышленном и сельскохозяйственном производстве, на транспорте, в строительстве и коммунальном хозяйстве, в быту применяются самые разнообразные технологические процессы, для реализации которых человеком созданы тысячи различных машин и механизмов. С помощью этих рабочих машин и механизмов осуществляется добыча полезных ископаемых, обрабатываются различные материалы и изделия, перемещаются люди, предметы труда, жидкости, газ и реализуются многие другие процессы, необходимые для жизнеобеспечения человека. Так, добыча полезных ископаемых ведется с помощью экскаваторов, буровых установок и угольных комбайнов, детали и материалы обрабатываются на разнообразных станках, люди и изделия перемещаются транспортными средствами, лифтами и эскалаторами, жидкости и газы транспортируются с помощью насосов и вентиляторов.

Рабочая машина или производственный механизм состоит из множества взаимосвязанных деталей и узлов, один из которых непосредственно выполняет заданный технологический процесс или операцию и поэтому называется исполнительным органом (ИО). В лифтах — это кабина, в экскаваторах — ковш, у вентиляторов и насосов — рабочее колесо (крыльчатка). Отметим при этом одно очень важное обстоятельство — все названные технологические процессы осуществляются за счет механического движения ИО рабочих машин и механизмов.

Характерным для многих рабочих машин является наличие не одного, а двух или даже нескольких взаимодействующих ИО. Например, при обработке на токарном станке деталь вращается вокруг своей оси, при этом резец, перемещаясь вдоль детали, снима-

ет с нее слой металла — стружку. В этом случае вращение детали осуществляет шпиндель станка (первый исполнительный орган), а поступательно перемещает резец механизм подачи станка (второй исполнительный орган).

Во многих технологических процессах требуется управлять движением ИО — регулировать скорость движения и ее направление, точно осуществлять остановку в заданной позиции, ограничивать ускорение движения. Такое регулирование необходимо в лифтах, прокатных станах, транспортерах, многих станках и др.

Исполнительный орган в процессе выполнения заданной операции должен преодолевать сопротивление своему движению, обусловленное наличием трения или притяжения Земли, упругой и пластической деформациями веществ или другими факторами. Для этого к нему необходимо подвести механическую энергию от устройства, которое в соответствии со своим назначением получило название привода.

Механическая энергия вырабатывается приводом, который преобразовывает другие виды энергии. В зависимости от вида используемой первичной энергии различают гидравлический, пневматический, тепловой и электрический приводы. В современном промышленном производстве, коммунальном хозяйстве и в быту наибольшее применение нашел электрический привод (ЭП), на долю которого приходится более 60 % потребляемой в стране электроэнергии.

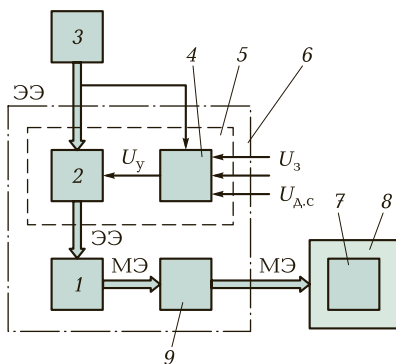
Такое широкое применение ЭП объясняется целым рядом его преимуществ по сравнению с другими видами приводов: использование электрической энергии, распределение и преобразование которой в другие виды энергии, в том числе и в механическую, наиболее экономично; большой диапазон мощности и скорости движения; разнообразие конструктивного исполнения, что позволяет рационально соединять привод с исполнительным органом рабочей машины и использовать для работы в сложных условиях — в воде, среде агрессивных жидкостей и газов, космическом пространстве; простота автоматизации технологических процессов; высокий КПД и экологическая чистота.

Возможности использования современных ЭП продолжают постоянно расширяться за счет достижений в смежных областях науки и техники — электромашиностроении и электроаппаратостроении, электронике и вычислительной технике, автоматике и механике.

Для выполнения своей основной функции — приведения в движение исполнительных органов рабочих машин и механизмов

Рис. 5.1. Структурная схема электропривода:

1 — двигатель; 2 — преобразователь; 3 — источник электроэнергии; 4 — блок управления; 5 — система управления; 6 — электропривод; 7 — исполнительный орган; 8 — рабочая машина; 9 — передаточное устройство



и управления этим движением — ЭП включает в себя совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом электротехнических, электромеханических и механических элементов и устройств. Такая электромеханическая система и получила название электрического привода. Общая структурная схема ЭП показана на рис. 5.1, где утолщенными линиями показаны силовые каналы энергии, а тонкими линиями — маломощные (информационные) цепи.

Основным элементом любого электропривода 6 служит электрический двигатель 1, который вырабатывает механическую энергию (МЭ) за счет потребляемой электрической энергии, т. е. является электромеханическим преобразователем энергии. В некоторых режимах работы ЭП электродвигатель осуществляет и обратное преобразование энергии, получая механическую энергию от исполнительного органа рабочей машины.

От электродвигателя механическая энергия через передаточное устройство 9 (механическое, гидравлическое, электромагнитное) подается на исполнительный орган 7 рабочей машины 8, за счет чего тот совершает требуемое механическое движение. Функция передаточного устройства заключается в согласовании параметров движения электродвигателя и исполнительного органа. Прогрессивным направлением развития ЭП является использование непосредственного соединения электродвигателя с исполнительным органом, что позволяет повысить технико-экономические показатели работы комплекса «электропривод — рабочая машина».

Электрическая энергия поступает в ЭП от источника электроэнергии 3. Для получения электроэнергии с требуемыми для электродвигателя параметрами и управления потоком этой энергии

между двигателем и источником электроэнергии включается силовой преобразователь 2.

Функции управления и автоматизации в ЭП осуществляются маломощным блоком управления 4. Этот блок вырабатывает сигнал управления U_y с помощью входного сигнала U_z , задающего характер движения исполнительного органа, и ряда дополнительных сигналов $U_{A,C1}$, дающих информацию о реализации технологического процесса рабочей машины, характере движения исполнительного органа, работе отдельных узлов ЭП, возникновении аварийных ситуаций и др. Преобразователь 2 вместе с блоком управления 4 образуют систему управления электроприводом 5.

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

В ЭП используются электродвигатели вращательного и поступательного движения постоянного и переменного тока непрерывного и дискретного перемещений; механические преобразователи в виде цилиндрических, червячных и планетарных редукторов, передач винт — гайка, цепных и ременных передач, гидравлических и электромагнитных муфт; электрические силовые преобразователи, включающие в себя управляемые выпрямители, инверторы тока и напряжения, регуляторы частоты и напряжения, импульсные регуляторы напряжения; устройства управления, в состав которых входят командоаппараты, блоки логических элементов, регуляторы, усилители, микропроцессоры и управляющие электронные машины. Как видно, реализация ЭП может быть весьма разнообразной, что находит свое отражение в их классификации.

ЭП классифицируются по характеру движения, виду и способам реализации силового преобразователя, числу используемых электродвигателей, виду источников электроэнергии, способу управления, наличию или отсутствию механической передачи и т. д. Выделим только наиболее важные ее составляющие.

По **характеру движения** различают ЭП вращательного и поступательного движения, при этом их скорость может быть регулируемой или нерегулируемой, а само движение — непрерывным или дискретным, однонаправленным, двунаправленным (реверсивным) или вибрационным (возвратно-поступательным).

По **числу используемых двигателей** различают групповые, индивидуальные и взаимосвязанные ЭП. Групповой ЭП характеризуется тем, что один его двигатель приводит в движение несколько исполнительных органов одной машины или один исполнительный орган нескольких рабочих машин. Индивидуальный ЭП обеспечивает движение одного исполнительного органа рабочей машины. Взаимосвязанный ЭП представляет собой два или несколько электрически или механически связанных между собой индивидуальных ЭП, работающих совместно на один или несколько исполнительных органов. При этом если двигатели связаны между собой механически и работают на общий вал, ЭП называется многодвигательным, а если двигатели связаны электрическими цепями, ЭП называется электрическим валом.

По **виду электрического силового преобразователя** различают многообразные ЭП. Если в качестве характерного признака взять способ преобразования напряжения источника электроэнергии, можно выделить четыре вида силовых преобразователей: управляемые и неуправляемые выпрямители, которые преобразуют напряжение переменного тока в напряжение постоянного (выпрямленного) тока; инверторы, выполняющие обратное преобразование; преобразователи частоты и напряжения переменного тока, изменяющие параметры напряжения переменного тока; импульсные преобразователи напряжения постоянного тока с различным видом модуляции выходного напряжения постоянного тока.

Все эти силовые преобразователи могут быть выполнены на различной элементной базе, а именно с использованием электрических машин, магнитных усилителей, ионных и полупроводниковых элементов. Современные силовые преобразователи являются, как правило, полупроводниковыми, и в них используются главным образом силовые транзисторы, диоды, тиристоры и их разновидности.

Как следует из приведенной классификации, конкретная реализация ЭП может быть разнообразной, но работа любого электропривода подчиняется некоторым общим закономерностям, что и является предметом теории ЭП, основы мы рассматриваем.

5.2.

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В механическом движении участвуют подвижная часть электродвигателя (ротор или якорь), элементы механического передаточного устройства и исполнительный орган. Совокупность этих элементов называют механической частью ЭП.

Движение любого элемента механической части ЭП (или исполнительного органа рабочей машины) подчиняется известным из курса физики законам механики. Поступательное и вращательное движения описываются соответственно следующими уравнениями:

$$\sum F = dv/dt + vdm/dt; \quad (5.1)$$

$$\sum M = Jd\omega/dt + \omega dJ/dt, \quad (5.2)$$

где $\sum F$ и $\sum M$ — соответственно совокупность сил и моментов, действующих на элемент; m и J — соответственно масса и момент инерции элемента; t — время; ω и v — соответственно угловая и линейная скорости движения элемента.

Уравнения движения по своему характеру являются дифференциальными, поскольку содержат производные скорости, массы и момента инерции.

В большинстве случаев масса и момент инерции элементов при движении не изменяются, их производные оказываются равными нулю и уравнения (5.1) и (5.2) упрощаются:

$$\sum F = mdv/dt = ma; \quad (5.3)$$

$$\sum M = Jd\omega/dt = J\varepsilon, \quad (5.4)$$

где $a = dv/dt$ и $\varepsilon = d\omega/dt$ — соответственно ускорения при поступательном и вращательном движениях.

Уравнения (5.3) и (5.4) отражают известный закон механики: ускорение движения механического элемента (материальной точки) пропорционально алгебраической сумме действующих на него сил (моментов) и обратно пропорционально его массе (моменту инерции).

Если

$$\sum F = 0; \sum M = 0, \quad (5.5)$$

то $dv/dt = d\omega/dt = 0$ и элемент движется с постоянной скоростью или находится в состоянии покоя.

Другими словами, элемент будет двигаться с неизменной скоростью (или будет неподвижным), если сумма сил или моментов, к нему приложенных, будет равна нулю. Такое движение называют установившимся.

При $\sum F > 0$ или $\sum M > 0$ элемент будет двигаться с ускорением, а при $\sum F < 0$ или $\sum M < 0$ — с замедлением. Условия (5.5) используются для определения параметров установившегося механического движения.

5.3. РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Элементы, образующие механическую часть ЭП, связаны между собой и оказывают тем самым друг на друга соответствующее воздействие. Поэтому, анализируя механическое движение того или иного элемента, необходимо учитывать влияние на него других элементов кинематической схемы ЭП. Это достигается соответствующим пересчетом входящих в уравнения (5.1)...(5.4) сил, моментов, масс и моментов инерции к элементу, движение которого рассматривается. Такой расчет в теории ЭП получил название операции приведения, а сами пересчитанные переменные и параметры называют приведенными.

Рассмотрим подробнее операцию приведения и получим соответствующие математические формулы на примере механической части ЭП подъемной лебедки, кинематическая схема которой показана на рис. 5.2, а. Электродвигатель 1 вращательного движения с моментом инерции J_{Δ} через одноступенчатый редуктор 4 с парой шестерен 5 и 6 приводит во вращение с угловой скоростью ω_6 барабан 8 подъемной лебедки, который с помощью троса 9 и крюка 10 поднимает (или опускает) с линейной скоростью $v_{ио}$ груз 11 массой m . На схеме показаны также соединительные механические муфты 3 и 7, первая из которых служит шкивом для механического тормоза 2. Примем допущения, что все элементы приве-

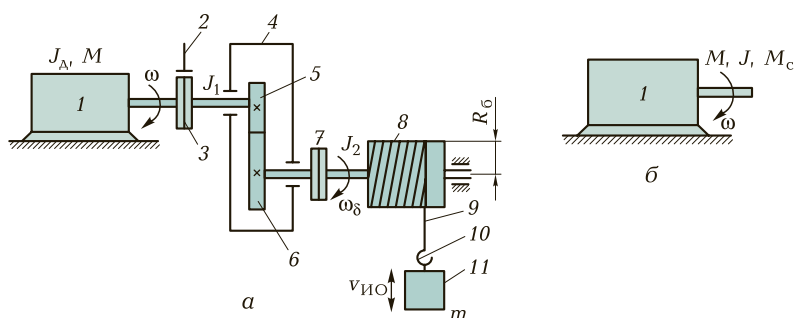


Рис. 5.2. Кинематическая схема электропривода подъемной лебедки (а) и одномассовая расчетная схема механической части (б):

1 — электродвигатель; 2 — механический тормоз; 3 и 7 — механические муфты; 4 — редуктор; 5 и 6 — шестерни; 8 — барабан подъемной лебедки; 9 — трос; 10 — крюк; 11 — груз

денной кинематической схемы являются абсолютно жесткими и между ними отсутствуют зазоры.

Операцию приведения можно выполнять относительно любого элемента, движение которого подлежит рассмотрению. Обычно в качестве такого элемента выбирают двигатель 1, являющийся источником механического движения. В этом случае сущность операции приведения состоит в том, что реальная схема механической части ЭП (рис. 5.2, а) заменяется некоторой расчетной (эквивалентной) схемой, основой которой является двигатель 1 (рис. 5.2, б), а остальные элементы этой схемы представляются некоторыми пока неизвестными приведенными моментом нагрузки (сопротивления) M_c и моментом инерции J . Такая расчетная схема получила название одномассовой схемы или жесткого приведенного механического звена.

Математические соотношения, позволяющие определить M_c и J и тем самым перейти к расчетной схеме, определяются исходя из закона сохранения энергии.

Определение приведенного момента инерции J . Запишем выражения для определения кинетической энергии элементов в реальной (рис. 5.2, а) и расчетной (рис. 5.2, б) схемах и приравняем их друг к другу:

$$J\omega^2/2 = J_A\omega^2/2 + J_1\omega^2/2 + J_2\omega_6^2/2 + mv_{ИО}^2/2, \quad (5.6)$$

где J_1 — суммарный момент инерции элементов, вращающихся со скоростью ω (кроме двигателя); J_2 — момент инерции элементов, вращающихся со скоростью барабана ω_6 .

Умножая обе части выражения (5.6) на $2/\omega^2$, получим

$$J = J_A + J_1 + J_2(\omega_6/\omega)^2 + m(v_{ИО}/\omega)^2. \quad (5.7)$$

Отметим, что в (5.7) отношение $\omega/\omega_6 = z_2/z_1 = i$ (z_2 и z_1 — соответственно число зубцов шестерен 6 и 5) является передаточным отношением редуктора, а отношение $v_{ИО}/\omega = \rho = \omega_6 R_6/\omega = R_6/i$ представляет собой так называемый радиус приведения кинематической схемы между исполнительным органом (крюком 10) и валом двигателя. С учетом этого окончательно получим

$$J = J_A + J_1 + J_2/i^2 + m\rho^2. \quad (5.8)$$

Из (5.8) вытекает общее правило: для расчета J следует моменты инерции вращающихся элементов разделить на квадрат передаточного числа кинематической схемы между этими элементами и валом двигателя, а массы поступательно движущихся элементов умножить на квадрат радиуса приведения и полученные результа-

ты расчета сложить с моментами инерции двигателя и элементов, вращающихся с его скоростью.

Определение приведенного момента нагрузки M_c . При подъеме груза к исполнительному органу от ЭП должна быть подведена механическая мощность

$$P_{\text{ИО}} = F_{\text{ИО}}v_{\text{ИО}} = mgv_{\text{ИО}},$$

где g — ускорение силы тяжести; $F_{\text{ИО}}$ — усилие, развиваемое исполнительным органом.

Учитывая с помощью КПД потери мощности в кинематической цепи, запишем баланс мощности нагрузки ЭП в реальной и расчетной схемах:

$$M_c\omega = mgv_{\text{ИО}}/\eta, \quad (5.9)$$

где $\eta = \eta_p\eta_\delta$ — результирующий КПД кинематической схемы ЭП; η_p и η_δ — соответственно КПД редуктора 4 и барабана 8.

Разделив обе части (5.9) на ω , находим

$$M_c = mgv_{\text{ИО}}/(\eta\omega) = F_{\text{ИО}}\rho/\eta. \quad (5.10)$$

Если исполнительный орган совершает не поступательное, а вращательное движение, то

$$M_c\omega = M_{\text{ИО}}\omega_{\text{ИО}}/\eta, \quad (5.11)$$

где $M_{\text{ИО}}$ и $\omega_{\text{ИО}}$ — соответственно момент нагрузки и скорость исполнительного органа, а приведенный момент нагрузки

$$M_c = M_{\text{ИО}}/(\eta i). \quad (5.12)$$

При спуске груза запасенная в нем потенциальная энергия передается к двигателю, частично расходуясь на преодоление потерь в кинематической схеме. В силу этого к двигателю поступает меньшая энергия и тогда при поступательном движении

$$M_c = F_{\text{ИО}}\eta\rho, \quad (5.13)$$

а при вращательном

$$M_c = M_{\text{ИО}}\eta/i. \quad (5.14)$$

Отметим, что приведенный момент нагрузки M_c также называют статическим моментом или моментом сопротивления.

При использовании в ЭП двигателя поступательного движения, пока еще редко применяемого, приведение осуществляется по тем же принципам.

Выполнение операции приведения и переход тем самым к расчетной схеме (рис. 5.2, б) позволяет раскрыть левую часть уравнения (5.4). В общем случае входящие в него моменты двигателя M и сопротивления M_c могут иметь как положительные, так и отрицательные знаки:

$$\pm M \pm M_c = Jd\omega/dt. \quad (5.15)$$

Правило, по которому определяются эти знаки, следующее: если направление действия момента совпадает с направлением скорости, то такой момент считается положительным, и наоборот.

В наиболее типичном для ЭП случае двигатель создает движущий момент, а исполнительный орган — момент сопротивления движению. Тогда (5.15) принимает следующий вид:

$$M - M_c = Jd\omega/dt. \quad (5.16)$$

Левая часть уравнения (5.16), представляющая собой разность моментов двигателя и нагрузки, и определяющая условия ускорения или замедления движения, в теории электропривода получила название динамического момента, $M_{дин} = M - M_c$.

Реальные кинематические схемы ЭП содержат упругие элементы (элементы конечной жесткости), между которыми могут существовать зазоры. Так, например, на рис. 5.2, а таким упругим элементом является трос 9, на котором подвешивается груз. При значительной протяженности к упругим элементам относят и соединительные валы. Зазоры в этой схеме могут существовать в соединительных муфтах 3 и 7, а также в шестеренчатом зацеплении и подшипниках.

Наличие упругих элементов и зазоров усложняет расчетную схему механической части ЭП, превращая ее в многомассовую. Так, если в расчет принимать упругость одного элемента и зазоры при этом не учитывать, то выполнение операции приведения позволит представить механическую часть ЭП в виде так называемой двухмассовой расчетной схемы, изображенной на рис. 5.3.

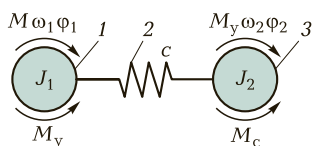


Рис. 5.3. Двухмассовая расчетная схема механической части:

1 — первая масса; 2 — упругий элемент; 3 — вторая масса

В этой схеме упругий элемент 2 с коэффициентом жесткости c соединяет две массы 1 и 3 с моментами инерции соответственно J_1 и J_2 . Первая из масс, которая включает в себя массу движущейся части двигателя и жестко связанных с ним элементов кинематической схемы, вращается со скоростью ω_1 , а другая масса, включающая в себя массу исполнительного органа и жестко связанных с ним элементов, — со скоростью ω_2 . К первой массе приложен при этом момент двигателя M и упругий момент M_y , а ко второй — упругий момент и момент нагрузки M_c . Движение двухмассовой системы описывается в этом случае совокупностью следующих уравнений:

$$\begin{aligned} M - M_y &= J_1 d\omega_1/dt; \\ M_y - M_c &= J_2 d\omega_2/dt; \\ M_y &= c(\varphi_1 - \varphi_2), \end{aligned} \quad (5.17)$$

где φ_1, φ_2 — углы поворота соответственно первой и второй масс; c — коэффициент жесткости, определяемый материалом и геометрическими размерами упругого элемента 2.

При учете упругости двух или более элементов расчетная схема получается соответственно трехмассовой, четырехмассовой и т. д. Многомассовые расчетные схемы получаются и в том случае, когда необходимо принять во внимание зазоры в кинематической схеме ЭП. Движение элементов в многомассовых схемах более сложное и многообразное, и для его анализа требуется применение вычислительной техники.

Задача 5.1. Выполнить операцию приведения в случае подъема груза при следующих параметрах кинематической схемы (см. рис. 5.2, а): $J_A = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $J_1 = 0,02 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $J_2 = 2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $m = 1000 \text{ кг}$; $R_6 = 1,15 \text{ м}$; $v_{\text{ИО}} = 0,9 \text{ м/с}$; $z_1 = 14$; $z_2 = 86$; $\eta_p = 0,97$; $\eta_6 = 0,96$.

Передаточное число редуктора

$$i = z_2/z_1 = 86/14 = 6,14;$$

радиус приведения кинематической схемы

$$\rho = R_6/i = 0,15/6,14 = 0,024 \text{ м};$$

момент инерции

$$J = J_A + J_1 + J_2/i^2 + m\rho^2 = 0,1 + 0,02 + 2/6,14^2 + 1000 \cdot 0,024^2 = 0,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

приведенный момент нагрузки

$$M_c = mg\rho/(\eta_p\eta_6) = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,024/(0,97 \cdot 0,96) = 253 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

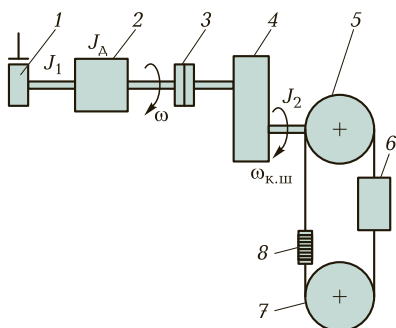


Рис. 5.4. Кинематическая схема электропривода лифта:
 1 — тормоз; 2 — двигатель; 3 — муфта; 4 — редуктор; 5 — канатоведущий шкив; 6 — кабина; 7 — канат; 8 — противовес

Задача 5.2. Для рассмотренного ранее примера определить J и M_c в случае спуска груза, приняв те же значения параметров и КПД кинематической схемы.

Задача 5.3. Записать в общем виде формулы для определения J и M_c , если заданы следующие параметры кинематической схемы лифта, показанной на рис. 5.4: грузоподъемность лифта $m_{гр}$, кг; скорость движения кабины $v_{ИО}$, м/с; масса кабины $m_{кп}$, кг; масса противовеса $m_{пв}$, кг; диаметр канатоведущего шкива $d_{к.ш}$, м; передаточное число редуктора i_p ; КПД механической части $\eta_{м.ч}$; длина троса $L_{т}$, м; масса погонного метра троса $m_{т}$, кг/м; моменты инерции элементов, вращающихся со скоростями ω и $\omega_{к.ш}$, соответственно J_1 и J_2 , а также момент инерции двигателя J_A . Двигатель 2 связан с тормозом 1 и через муфту 3 — с редуктором 4.

Задача 5.4. Для кинематической схемы механической части ЭП тележки мостового крана, показанной на рис. 5.5, определить J и M_c при следующих исходных данных: скорость перемещения тележки $v_{ИО} = 0,8$ м/с; диаметр ходовых колес $d_{х.к} = 0,6$ м; общая масса тележки с грузом

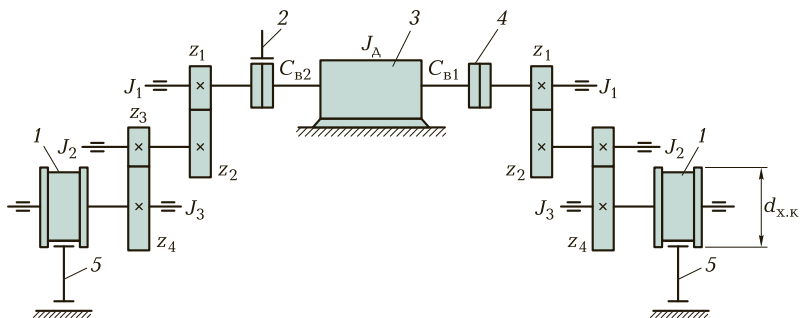


Рис. 5.5. Кинематическая схема электропривода механизма передвижения:
 1 — ходовые колеса; 2 — тормоз; 3 — двигатель; 4 — муфта; 5 — рельсы

$m_T = 8500$ кг, сила сопротивления движению тележки $F_{\text{ио}} = 120\,000$ Н; $J_A = 0,1$ кг·м²; $J_1 = 0,15$ кг·м²; $J_2 = 0,01$ кг·м²; $J_3 = 0,05$ кг·м²; $z_1 = 20$; $z_2 = 79$; $z_3 = 16$; $z_4 = 83$; КПД одной шестеренчатой пары $\eta_{\text{ш}} = 0,97$.

5.4. УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ

Для расчетной одномассовой схемы, показанной на рис. 5.2, б, установившееся механическое движение ЭП будет определяться равенством моментов двигателя и нагрузки, т. е. условием $M = M_c$. Проверка выполнения этого условия может производиться аналитически или с помощью так называемых механических характеристик двигателя и исполнительного органа.

Механической характеристикой двигателя называется зависимость его скорости от развиваемого момента $\omega(M)$ (для вращательного движения) или усилия $v(F)$ (для поступательного движения). Различают естественную и искусственную характеристики двигателей.

Естественная характеристика двигателя (она у него единственная) соответствует основной (паспортной) схеме его включения и номинальным параметрам питающего напряжения. Естественные механические характеристики двигателей вращательного движения показаны на рис. 5.6, а (1...4 — соответственно син-

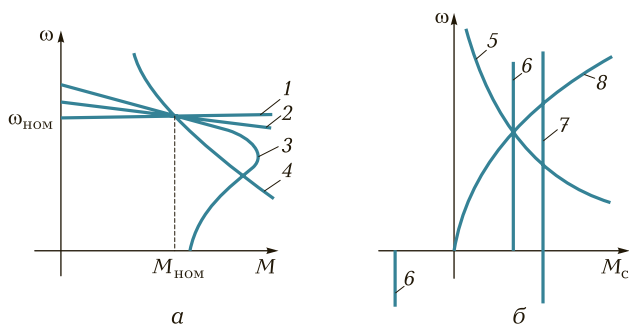


Рис. 5.6. Механические характеристики:

а — *двигателей*: 1 — синхронного; 2 — постоянного тока с независимым возбуждением; 3 — асинхронного; 4 — постоянного тока с последовательным возбуждением; б — *исполнительных органов рабочих машин*: 5 — механизма главного движения металлообрабатывающего станка; 6 — транспортера, механизма подачи станков; 7 — подъемного механизма; 8 — центробежных насосов, вентиляторов и компрессоров

хронного, постоянного тока с независимым возбуждением, асинхронного и постоянного тока с последовательным возбуждением). На естественной характеристике располагается точка номинального (паспортного) режима работы двигателя с координатами $\omega_{\text{ном}}$, $M_{\text{ном}}$.

Если включение двигателя происходит не по основной схеме, или в его электрические цепи включены какие-либо дополнительные электротехнические элементы (резисторы, реакторы, конденсаторы), или двигатель питается напряжением с ненормальными параметрами, то его характеристики будут называться искусственными. Таких характеристик у двигателя может быть сколь угодно много. Поскольку эти характеристики получают в целях регулирования переменных (координат) двигателя — тока, момента, скорости, положения, то они иногда называются регулировочными. Искусственные характеристики двигателя и способы их получения подробно рассматриваются далее.

Механической характеристикой исполнительного органа называется зависимость скорости его движения от усилия или момента на нем, т.е. $\omega_{\text{ИО}}(M_{\text{ИО}})$ при вращательном движении и $v_{\text{ИО}}(F_{\text{ИО}})$ при поступательном движении. В результате операции приведения эти характеристики преобразуются в зависимость вида $\omega(M_c)$, где ω — скорость двигателя, а M_c — приведенный к его валу момент нагрузки (сопротивления). Механические характеристики некоторых исполнительных органов показаны на рис. 5.6, б (5 — механизма главного движения металлообрабатывающего станка; 6 — транспортера, механизма подачи станка; 7 — подъемного механизма; 8 — вентилятора, дымососа, компрессора и центробежного насоса). Отметим, что реальные механические характеристики исполнительных органов более сложны по своему виду и обычно представляют собой сочетание показанных на рис. 5.6, б зависимостей.

По характеру действия моменты нагрузки M_c подразделяются на активные и реактивные. *Активные моменты* имеют постоянное, не зависящее от скорости направление своего действия и создаются так называемыми потенциальными силами — силами притяжения Земли (характеристика 7), силами упругой деформации и др.

Реактивный момент, характеристика которого соответствует зависимости б на рис. 5.6, б, создается в основном силами трения, он всегда противодействует движению и поэтому изменяет свой знак с изменением направления скорости движения.

Количественно механические характеристики двигателя и исполнительного органа оцениваются жесткостью

$$\beta = dM/d\omega \approx \Delta M/\Delta\omega. \quad (5.18)$$

Используя этот показатель, можно оценить характеристику синхронного двигателя 1 как абсолютно жесткую ($\beta = \infty$), характеристику асинхронного двигателя 3 — как имеющую переменную положительную и отрицательную жесткости, а характеристику подъемного механизма 7 — как имеющую нулевую жесткость ($\beta = 0$) и т. д.

Введенное понятие механических характеристик позволяет графически выполнить проверку условия установившегося движения и найти его параметры. Для этого в одном и том же квадранте совмещаются характеристики двигателя 1 и исполнительного органа 2, как это показано на рис. 5.7. Точка А пересечения этих характеристик, в которой моменты двигателя и исполнительного органа равны, и будет соответствовать установившемуся движению со скоростью $\omega_{уст}$ и моментом $M_{уст}$.

Аналитический способ для такой проверки применяется в тех случаях, когда механические характеристики двигателя и нагрузки заданы в виде двух уравнений, совместное решение которых при условии $M = M_c$ дает искомое значение $\omega_{уст}$. Подстановка этого значения скорости в любое из двух уравнений механических характеристик позволяет получить значение установившегося момента.

Видом механических характеристик двигателя и исполнительного органа определяется устойчивость установившегося движения. Под устойчивостью понимается свойство системы «двигатель — исполнительный орган» поддерживать движение со скоростью $\omega_{уст}$ или с минимально возможными отклонениями от нее.

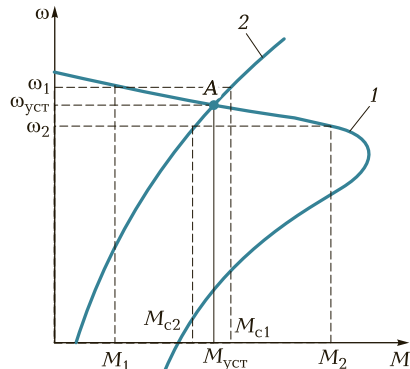


Рис. 5.7. Графики к определению установившейся скорости и устойчивости движения:

1 — характеристика асинхронного двигателя; 2 — характеристика исполнительного органа

Рассмотрим способ определения устойчивости движения с помощью механических характеристик (рис. 5.7).

Предположим, что по какой-то причине скорость ЭП повысилась до уровня ω_1 . Выясним, что будет происходить со скоростью, если вызвавшая ее изменение причина исчезнет. Из характеристик двигателя и исполнительного органа видно, что при скорости ω_1 момент нагрузки M_{c1} больше момента двигателя M_1 , т. е. $M_1 < M_{c1}$. Тогда в соответствии с (5.16) в системе «двигатель — исполнительный орган» будет действовать отрицательный динамический момент. Начнется процесс торможения ($d\omega/dt < 0$), который закончится при скорости $\omega_{уст}$.

Рассмотрим теперь положение, при котором кратковременное возмущение вызвало снижение скорости до уровня $\omega_2 < \omega_{уст}$. В этом случае $M_2 > M_{c2}$ и под действием уже положительного динамического момента скорость начнет возрастать, пока не достигнет уровня $\omega_{уст}$. Таким образом, система «двигатель — исполнительный орган» с показанными на рис. 5.7 механическими характеристиками обладает свойством возвращаться к скорости установившегося движения при возможных отклонениях от нее, т. е. движение в такой системе является устойчивым.

Проверка на устойчивость движения может быть выполнена также аналитически с использованием понятия жесткости характеристик. Движение будет устойчиво при выполнении условия

$$\beta - \beta_c < 0 \text{ или } \beta < \beta_c, \quad (5.19)$$

где β и β_c — соответственно жесткости механических характеристик двигателя и исполнительного органа, и наоборот.

5.5. НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Неустановившееся движение ЭП имеет место, когда моменты двигателя и нагрузки отличаются друг от друга, т. е. $M \neq M_c$. В этом случае динамический момент $M_{дин}$ не равен нулю и происходит увеличение или снижение скорости движения. Наиболее типичными примерами неустановившегося движения в ЭП являются пуск, торможение и реверс двигателя, его переходы с одной скорости на другую в процессе ее регулирования или изменения нагрузки на валу.

Неустановившееся движение возникает при переходе ЭП из установившегося движения с одними параметрами к установив-

шемуся движению с другими параметрами (если, конечно, движение устойчивое). По этой причине неустановившееся движение называют также переходным процессом или переходным режимом ЭП.

Целью рассмотрения неустановившегося движения является получение зависимостей механических переменных (координат) ЭП — моментов, скорости и угла поворота вала двигателя от времени. Рассмотрим переходные процессы в механической части ЭП, обусловленные инерционностью движущихся элементов. Иногда такие процессы называют механическими.

Искомые зависимости получим решением (интегрированием) дифференциального уравнения механического движения (5.15), а также дифференциального уравнения $\omega = d\varphi/dt$, связывающего угол поворота φ вала двигателя и его скорость ω .

Для решения этих уравнений необходимо знать законы изменения моментов двигателя и нагрузки, а также массы и моменты инерции движущихся элементов и начальные (нулевые) значения переменных.

В общем случае моменты двигателя и нагрузки, а иногда и момент инерции могут являться функциями времени, скорости и положения ИО (угла поворота вала двигателя).

Из всего многообразия возможных переходных процессов рассмотрим сначала случай, когда **моменты двигателя и нагрузки** ЭП являются постоянными величинами, не зависящими от скорости или времени, а моменты инерции и массы движущихся элементов не изменяются в переходных процессах.

На рис. 5.8, а показаны механические характеристики двигателя 2 и нагрузки (исполнительного органа) 1, при которых их мо-

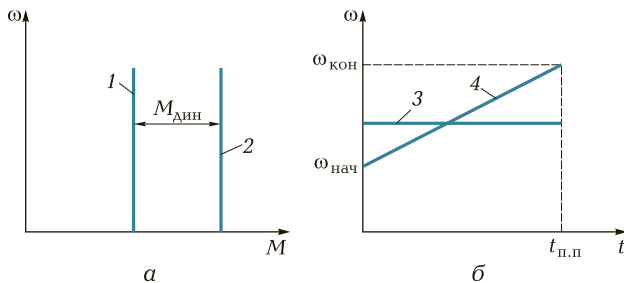


Рис. 5.8. Механические характеристики (а) и графики переходного процесса (б) при постоянном динамическом моменте:

1 — механическая характеристика исполнительного органа; 2 — механическая характеристика двигателя; 3 — график момента; 4 — график скорости

менты неизменны, т. е. динамический момент постоянен и положительен. Уравнение движения (5.16) в этом случае решается методом разделения переменных:

$$\omega = (M - M_c)t/J + C. \quad (5.20)$$

Постоянная интегрирования C находится из начального условия переходного процесса: при $t = 0$ $\omega = \omega_{\text{нач}}$. Подставляя это условие в (5.20), получим $C = \omega_{\text{нач}}$. Тогда окончательно (5.20) принимает вид

$$\omega = [M - M_c]/J t + \omega_{\text{нач}}. \quad (5.21)$$

Полученная формула показывает, что при разбеге ЭП (рис. 5.8, б) скорость ω линейно зависит от времени t : при $(M - M_c) > 0$ она увеличивается (прямая 4), а при $(M - M_c) < 0$ — снижается. Момент двигателя от времени не зависит (прямая 3).

Время переходного процесса $t_{\text{п.п}}$, за которое скорость изменится от некоторого начального $\omega_{\text{нач}}$ до конечного $\omega_{\text{кон}}$ уровня, определяется из (5.21) при подстановке в нее $t = t_{\text{п.п}}$ и $\omega = \omega_{\text{кон}}$:

$$t_{\text{п.п}} = J(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}})/(M - M_c). \quad (5.22)$$

При **линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа** динамический момент ЭП также линейно зависит от скорости. Такие переходные процессы характерны для ЭП с двигателями постоянного тока независимого возбуждения, а также двигателями, характеристики которых могут быть частично или полностью представлены (аппроксимированы) прямыми линиями.

На рис. 5.9, а показаны линейные механические характеристики двигателя 1 и исполнительного органа 2, построенные по следующим уравнениям:

$$M = M_{\text{к.з}} - \beta\omega; \quad (5.23)$$

$$M_c = M_{\text{с0}} + \beta_c\omega,$$

где $M_{\text{к.з}}$ и $M_{\text{с0}}$ — моменты двигателя и исполнительного органа при нулевой скорости.

Подставляя эти выражения в уравнение движения (5.16), получим

$$M - M_c = M_{\text{к.з}} - \beta\omega - M_{\text{с0}} - \beta_c\omega = J(d\omega/dt). \quad (5.24)$$

В обычной для дифференциальных уравнений форме (5.24) будет иметь вид

$$T_M(d\omega/dt) + \omega = \omega_{\text{уст}} \quad (5.25)$$

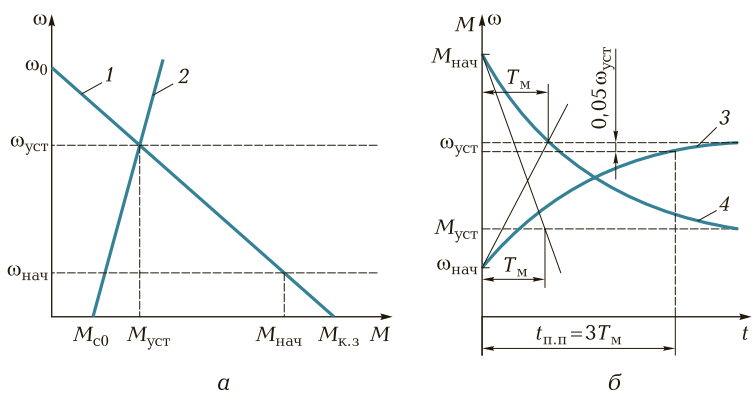


Рис. 5.9. Механические характеристики (а) и графики переходного процесса (б) при динамическом моменте, линейно зависящего от скорости: 1 — механическая характеристика двигателя; 2 — механическая характеристика исполнительного органа; 3 — график скорости; 4 — график момента

где $T_M = J / (\beta + \beta_c)$ — электромеханическая постоянная времени, с; $\omega_{уст} = (M_{к.з} - M_{c0}) / (\beta + \beta_c)$ — установившаяся скорость, соответствующая точке пересечения характеристик двигателя и исполнительного органа.

Выражение (5.25) по своей форме является линейным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка, решение которого имеет вид

$$\omega(t) = A e^{-t/T_M} + \omega_{уст}, \tag{5.26}$$

где постоянный коэффициент A определяется из начальных условий переходного процесса: при $t = 0$ $\omega = \omega_{нач}$, т. е.

$$A = \omega_{нач} - \omega_{уст}. \tag{5.27}$$

Тогда окончательно зависимость изменения скорости от времени будет иметь вид

$$\omega(t) = (\omega_{нач} - \omega_{уст}) e^{-t/T_M} + \omega_{уст}. \tag{5.28}$$

Запишем момент двигателя в функции времени исходя из (5.23):

$$M(t) = M_{к.з} - \beta \omega(t). \tag{5.29}$$

С учетом того что $\beta = \Delta M / \Delta \omega = M_{к.з} / \omega_0 = (M_{к.з} - M_{уст}) / \omega_{уст} = (M_{к.з} - M) / \omega$, после подстановки $\omega_{нач}$ и $\omega_{уст}$ получим

$$M(t) = (M_{нач} - M_{уст}) e^{-t/T_M} + M_{уст}. \tag{5.30}$$

В распространенном для ЭП случае, когда $\beta_c = 0$ (характеристикой исполнительного органа является вертикальная прямая линия), входящие в (5.28) и (5.30) параметры будут иметь упрощенный вид

$$T_m = J/\beta = J\omega_0/M_{к.з}; \omega_{уст} = (M_{к.з} - M_c)/\beta.$$

Время переходного процесса $t_{п.п.}$, за которое скорость двигателя изменится от некоторого начального значения $\omega_{нач}$ до конечного $\omega_{кон}$, определяется в этом случае логарифмированием (5.28):

$$t_{п.п} = T_m \ln[(\omega_{уст} - \omega_{нач})/(\omega_{уст} - \omega_{кон})]. \quad (5.31)$$

Анализ полученных выражений (5.28) и (5.30) показывает, что скорость и момент двигателя изменяются во времени по экспоненциальному закону с постоянной времени T_m . На рис. 5.9, б показаны графики переходного процесса разбега: $\omega(t)$ — кривая 3 и $M(t)$ — кривая 4 при увеличении скорости двигателя от $\omega_{нач}$ до $\omega_{уст}$. Отметим, что начальные и установившиеся уровни скорости и момента определяются из рис. 5.9, а, отражая связь установившегося и переходного движений ЭП.

Как следует из (5.31), время достижения установившихся уровней скорости и момента (т. е. время переходного процесса) является бесконечно большим. Поэтому в технических расчетах используют так называемое практическое время переходного процесса, принимаемое обычно равным трем постоянным времени, т. е. $t_{п.п} = 3T_m$. За этот интервал времени скорость достигает 95 % своего установившегося значения.

Постоянная времени T_m имеет определенное графическое и физическое выражение. На рис. 5.9, б она равна отрезку, отсекаемому касательной, проведенной к кривой переходного процесса в точке $t = 0$ на горизонтальной прямой, соответствующей установившемуся значению переменной (скорости или момента). Количественно T_m равна времени разгона t_p двигателя без нагрузки ($M_c = 0$) из неподвижного состояния ($\omega_{нач} = 0$) до скорости идеального холостого хода $\omega_0 = \omega_{уст}$ под действием пускового момента $M_{к.з}$. Действительно, из формулы (5.22) для указанных условий следует, что

$$t_{п.п} = t_p = J\omega_0/M_{к.з} = T_m.$$

При переходных процессах **при произвольном динамическом моменте** моменты двигателя и исполнительного органа различны и могут быть нелинейными функциями скорости, времени или положения. Основная сложность получения искомых зависимостей

$\omega(t)$ и $M(t)$ заключается в интегрировании уравнения движения, которое не имеет универсального способа решения. Поэтому в зависимости от исходных данных и требуемой точности расчета могут применяться различные методы получения кривых переходного процесса, которые кратко рассматриваются далее.

Линеаризация нелинейных механических характеристик двигателя и исполнительного органа основана на представлении (аппроксимации) этих характеристик или их отдельных участков прямыми линиями. В этом случае для построения кривых переходного процесса или расчета его продолжительности используются формулы (5.22), (5.28) и (5.30). Если механические характеристики аппроксимируются несколькими прямыми отрезками, то переходный процесс строится по участкам, при этом конечное значение переменной на предыдущем участке является начальным значением для следующего участка.

Точное интегрирование уравнения движения используется в тех случаях, когда моменты двигателя и исполнительного органа заданы аналитически (в виде формул) как функции скорости, положения или времени. Нахождение зависимостей $\omega(t)$ и $M(t)$ осуществляется подстановкой этих формул в уравнение (5.15) и его решением, которое является теоретически точным.

Методы численного интегрирования уравнения движения. Во многих случаях, когда механические характеристики двигателя и исполнительного органа заданы графически или в виде таблиц, целесообразно применять для решения разработанные в математике численные методы интегрирования дифференциальных уравнений, к которым и относится уравнение механического движения ЭП (5.16). Наиболее простым из них является метод Эйлера.

Графоаналитические методы построения кривых переходного процесса используются в случаях, когда механические характеристики двигателя и исполнительного органа заданы графически. В теории ЭП разработано несколько таких методов (например, методы площадей и пропорций), основанных также на решении уравнения (5.16).

Задача 5.5. Уравнения двигателя и исполнительного органа рабочей машины имеют соответственно вид $\omega = 300 - 3M$ и $M = 30 + 2\omega$. Определить аналитически установившиеся скорость $\omega_{уст}$ и момент $M_{уст}$.

Используя условие установившегося движения $M = M_{ст}$, запишем

$$30 + 2\omega_{уст} = (300 - \omega_{уст})/3,$$

откуда $\omega_{уст} = 30$ рад/с.

Подставляя полученное значение скорости в любое из двух уравнений, получим значение установившегося момента $M_{уст} = 90 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Задача 5.6. Рассчитать и построить зависимость $\omega(t)$ при следующих исходных данных: $M = 50 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_c = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $J = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $\omega_{нач} = 100 \text{ рад/с}$. Рассчитать время переходного процесса, за которое скорость снизится в два раза.

Задача 5.7. Определить динамический момент, который при $J = 0,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ обеспечит увеличение скорости на 200 рад/с за время $t_{п.п} = 1 \text{ с}$.

Задача 5.8. Получить общее выражение для определения зависимости угла поворота вала двигателя от времени $\varphi(t)$ для случая постоянного динамического момента и оценить вид этой зависимости.

Задача 5.9. Выполнить расчет и построение кривых переходного процесса $\omega(t)$ и $M(t)$ при линейной механической характеристике двигателя и следующих исходных данных: $\omega_{нач} = 0$; $\omega_{уст} = 150 \text{ рад/с}$, $M_{нач} = M_{к.з} = 150 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $\omega_0 = 200 \text{ рад/с}$; $M_{уст} = M_c = 40 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $J = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Оценить практическое время переходного процесса.

Задача 5.10. Рассчитать и построить зависимости $\omega(t)$ и $M(t)$ для двигателя, механическая характеристика которого показана на рис. 5.10, если $M_c = 0$, $\omega_{нач} = 200 \text{ рад/с}$.

Задача 5.11. Двигатель, механическая характеристика 3 которого показана на рис. 5.11, работая в установившемся режиме (точка А), преодолел момент сопротивления $M_{c1} = 150 \text{ Н} \cdot \text{м}$. В момент времени $t = 0$, принимаемый за начало отсчета, произошло скачкообразное изменение момента нагрузки (прямые 1, 2) до уровня $M_{c2} = 250 \text{ Н} \cdot \text{м}$ (точка Б). Рассчитать

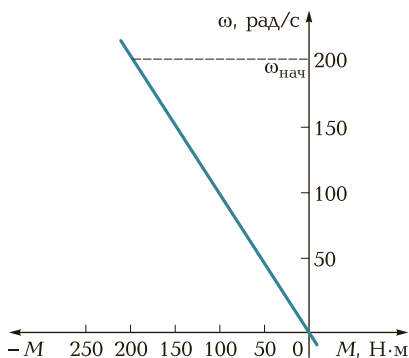


Рис. 5.10. Характеристика к задаче 5.10

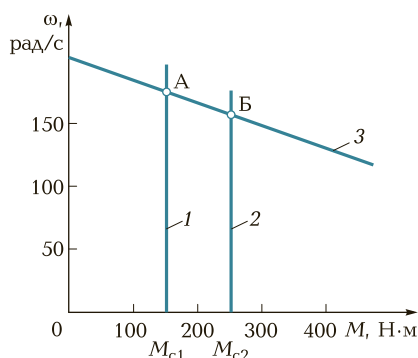


Рис. 5.11. Характеристики к задаче 5.11:

1 и 2 — механические характеристики исполнительного органа; 3 — механическая характеристика двигателя

и построить зависимости $\omega(t)$ и $M(t)$, соответствующие этому увеличению нагрузки.

Задача 5.12. Используя выражение (5.28), получить общее выражение изменения во времени угла поворота вала двигателя $\varphi(t)$. Рассчитать и построить эту зависимость для условий задачи 5.9.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие элементы относятся к механической части ЭП?
2. Запишите уравнения, описывающие поступательное и вращательное движения механических элементов.
3. Какое движение называется установившимся и какое неустановившимся?
4. Для чего выполняется операция приведения?
5. Поясните особенности расчета приведенного момента нагрузки при различных направлениях потока энергии в механической части ЭП.
6. Поясните правило определения знаков моментов в уравнении движения.
7. Что такое динамический момент ЭП?
8. Чем обусловлено использование многомассовых расчетных схем ЭП?
9. Приведите примеры механических характеристик двигателя и исполнительного органа.
10. Что такое жесткость механической характеристики?
11. Как с помощью механических характеристик двигателя и исполнительного органа определить скорость установившегося движения?
12. Как можно оценить устойчивость движения?
13. В каких случаях возникает неустановившееся движение ЭП?
14. Какова цель рассмотрения неустановившегося движения?
15. Какими уравнениями описывается неустановившееся движение?
16. Что такое динамический момент ЭП?
17. От каких факторов может в общем случае зависеть динамический момент ЭП?
18. Поясните физический смысл электромеханической постоянной времени и способ ее определения по кривым переходного процесса.
19. Назовите методы получения кривых переходного процесса при произвольном характере динамического момента ЭП.

РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

6.1. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ

Для обеспечения требуемых режимов работы машин, производственных механизмов и самого ЭП некоторые переменные, которые характеризуют их работу, должны регулироваться. Такими переменными, часто называемыми в ЭП координатами, являются, например, скорость, ускорение, положение ИО или любого другого механического элемента привода, токи в электрических цепях двигателей, моменты на их валу и др.

Типичным примером необходимости регулирования координат может служить ЭП пассажирского лифта. При пуске и остановке кабины лифта для обеспечения комфортности пассажиров ускорение и замедление ее движения ограничиваются. Перед остановкой скорость кабины должна снижаться, т.е. регулироваться. И, наконец, кабина с заданной точностью должна останавливаться на требуемом этаже. Такое управление движением кабины лифта обеспечивается за счет регулирования соответствующих координат (переменных) ЭП лифта.

Отметим, что процесс регулирования координат движения всегда связан с получением искусственных (регулируемых) характеристик двигателя, что достигается целенаправленным воздействием на двигатель. Рассмотрим подробнее регулирование основных координат ЭП.

Регулирование скорости движения исполнительных органов требуется во многих рабочих машинах и механизмах — прокатных станах, подъемно-транспортных механизмах, горнодобывающих и бумагоделательных машинах, металлообрабатывающих станках и др. С помощью ЭП обеспечиваются регулирование и стабилизация скорости движения их ИО, а также изменение скорости ИО в соответствии с произвольно изменяющимся зада-

ющим сигналом (слежение) или по заранее заданной программе (программное движение). Рассмотрим, каким образом с помощью ЭП можно обеспечивать регулирование скорости ИО рабочих машин.

Как следует из общей схемы ЭП (см. рис. 5.1), скорости двигателя и ИО при его вращательном или поступательном движении связаны между собой соотношениями

$$\omega_{\text{ИО}} = \omega/i \text{ или } v_{\text{ИО}} = \omega r. \quad (6.1)$$

Анализ выражения (6.1) показывает, что регулировать скорость движения ИО можно воздействуя или на механическую передачу, или на двигатель, или на то и другое одновременно.

В первом случае воздействие заключается в изменении передаточного числа i или радиуса приведения r механической передачи при постоянной скорости двигателя, поэтому этот способ регулирования получил название механического. Для его реализации используются коробки передач (при ступенчатом регулировании), вариаторы и электромагнитные муфты (для плавного регулирования). Применяется механический способ ограниченно из-за сложности автоматизации таких технологических процессов, малого набора регулируемых механических передач указанного типа и их невысоких надежности и экономичности.

Способ регулирования скорости ИО, получивший название электрического, предусматривает воздействие на двигатель при неизменных параметрах механической передачи. Этот способ нашел широкое применение в современных ЭП вследствие его больших регулировочных возможностей, простоты, удобства использования в общей схеме автоматизации технологических процессов и экономичности.

Комбинированный способ регулирования скорости ИО применяется ограниченно в основном в ЭП металлообрабатывающих станков.

Итак, управление движением исполнительных органов современных рабочих машин и механизмов в большинстве случаев достигается за счет целенаправленного воздействия на электродвигатель с помощью его системы управления в целях получения соответствующих искусственных характеристик.

Для примера на рис. 6.1 показаны естественная механическая характеристика 1 двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТНВ) и две искусственные — при введении в цепь якоря добавочного резистора с сопротивлением R_{Δ} (прямая 2) и уменьшении подаваемого на якорь напряжения (прямая 3). Обе

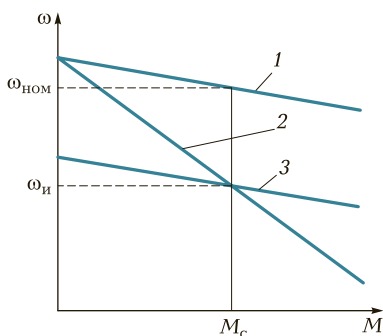


Рис. 6.1. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

1 — естественная; 2 — при включении резистора в цепь якоря; 3 — при снижении напряжения

эти искусственные характеристики обеспечивают при моменте нагрузки M_c снижение скорости до требуемого уровня ω_i . Увеличение скорости ДПТНВ больше номинальной может быть получено за счет уменьшения его магнитного потока.

Для количественной оценки и сопоставления различных способов регулирования скорости используются следующие показатели.

Диапазон регулирования скорости, определяемый отношением максимальной скорости к минимальной, т. е. $D = \omega_{\max}/\omega_{\min}$.

В соответствии же с рис. 6.1 диапазон регулирования будет определяться отношением $\omega_{\text{ном}}/\omega_i$ при заданном моменте нагрузки M_c .

Стабильность скорости, характеризуемая изменением скорости при возможных колебаниях момента нагрузки на валу двигателя и определяемая жесткостью его механических характеристик. Чем она больше, тем стабильнее скорость при изменениях момента нагрузки, и наоборот. В рассматриваемом примере большая стабильность обеспечивается при искусственной характеристике 3.

Плавность регулирования скорости, определяемая перепадом скорости при переходе с одной искусственной характеристики на другую. Чем больше в заданном диапазоне регулирования скорости может быть получено искусственных характеристик, тем плавнее будет происходить регулирование скорости.

Направление регулирования скорости. В зависимости от способа воздействия на двигатель и вида получаемых искусственных характеристик его скорость может увеличиваться или уменьшаться по сравнению с работой на естественной характеристике при данном моменте нагрузки. В первом случае говорят о регулировании скорости вверх от основной характеристики, во втором — вниз. Можно сказать, что регулирование скорости вверх связано

с получением искусственных механических характеристик, располагающихся выше естественной, а регулирование скорости вниз обеспечивается характеристиками, располагающимися ниже естественной.

Допустимая нагрузка двигателя. Электрический двигатель рассчитывается и проектируется таким образом, чтобы, работая на естественной характеристике с номинальными скоростью, током, моментом и мощностью, он не нагревался выше определенной температуры, на которую рассчитана его изоляция. В этом случае срок его службы является нормативным и составляет обычно 15—20 лет. Поскольку потери энергии при нагреве двигателя пропорциональны квадрату тока, нормативный нагрев будет иметь место при протекании номинального тока в нем. Отметим при этом, что нагрев определяется также и условиями охлаждения (вентиляции) двигателя.

При регулировании скорости двигатель работает уже на искусственных характеристиках, т. е. при отличных от паспортных условиях. Поэтому для сохранения его нормативного нагрева и тем самым расчетного срока службы нагрузка двигателя (при расчетных условиях его охлаждения) может быть только такой, при которой в нем протекает ток не больше номинального. Именно такая нагрузка и называется допустимой.

Все способы регулирования скорости делятся по этому признаку на две группы, для одной из которых характерна допустимая нагрузка, равная номинальному моменту, а для другой — равная номинальной мощности двигателя. При правильном выборе способа регулирования скорости двигатель полностью используется в соответствии со своими возможностями во всем диапазоне ее изменения.

Экономичность регулирования скорости. Получение одних и тех же показателей (диапазона, стабильности, плавности и т. д.) можно обеспечить с помощью различных ЭП и способов регулирования их скорости. Для выбора наиболее рационального вида регулируемого ЭП используются различные технико-экономические показатели — капитальные затраты на его реализацию, эксплуатационные расходы, срок окупаемости, надежность, удобство и простота в эксплуатации, серийность и унификация средств управления и др. Оценка или сопоставление экономических показателей проводится при выборе возможных способов регулирования скорости данного ЭП (или различных ЭП). В результате анализа всех возможных вариантов выявляется экономически обоснованное решение.

Обычно сопоставление вариантов регулируемого ЭП производится по капитальным затратам и эксплуатационным расходам с учетом срока окупаемости. Если капитальные затраты на реализацию ЭП окупаются за счет сокращения расходов при его эксплуатации за заданный срок, то такое техническое решение считается экономически обоснованным. С этой же целью могут использоваться и другие технико-экономические показатели.

Подчеркнем, что сопоставление и экономическая оценка различных способов регулирования скорости и тем самым регулируемых ЭП правомочны только в том случае, когда все они обеспечивают заданные технические характеристики рабочей машины или механизма.

6.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ МОМЕНТА И ТОКА ДВИГАТЕЛЕЙ

При формировании заданного графика движения исполнительных органов часто бывает необходимо обеспечивать требуемое их ускорение или замедление. В соответствии с выражениями (5.3) и (5.4) это достигается регулированием прикладываемого к исполнительным органам со стороны ЭП момента или усилия.

В некоторых технологических процессах (прокатка металла, изготовление проводов и кабелей, бумажное и текстильное производства) требуется, чтобы исполнительные органы рабочих машин создавали необходимое натяжение в обрабатываемом материале или изделии. Это также обеспечивается с помощью ЭП регулированием создаваемого им момента или усилия на исполнительных органах соответствующих рабочих машин и механизмов.

В некоторых случаях требуется ограничивать момент ЭП для предотвращения поломки рабочей машины или механизма при внезапном стопорении движения исполнительного органа (например, при копании грунта, бурении скважин, заклинивании механической передачи и др.). Основными показателями для оценки того или иного способа регулирования (ограничения) момента являются точность и экономичность.

Каким же образом можно изменять момент ЭП? Для ответа на этот вопрос вспомним, что развиваемый электрическим двигателем момент пропорционален произведению магнитного потока и тока якоря:

$$M = k\Phi I, \quad (6.2)$$

где k — конструктивный коэффициент двигателя.

Таким образом, изменяя ток якоря I или магнитный поток Φ , можно регулировать (ограничивать) момент.

Регулирование тока и момента двигателей требуется также и для обеспечения нормальной работы самих двигателей. Так, при пуске двигателей постоянного тока обычного исполнения для обеспечения нормальной работы их коллекторно-щеточного узла ток должен быть ограничен значением $3I_{\text{ном}}$. Необходимость ограничения тока возникает и в случае пуска мощных двигателей постоянного и переменного тока, так как их большие пусковые токи могут привести к недопустимому снижению напряжения питающей сети.

Для анализа возможности регулирования тока используется электромеханическая характеристика двигателя (иногда называемая скоростной), которая представляет собой зависимость его скорости от тока $\omega(I)$. Для двигателей постоянного тока независимого возбуждения при постоянном (нерегулируемом) магнитном потоке электромеханическая характеристика повторяет механическую. Регулирование момента чаще всего производится воздействием на ток двигателя посредством изменения подводимого к нему напряжения или включения в его цепи добавочных резисторов. Отметим, что регулирование тока и момента может осуществляться только в динамическом (переходном) режиме работы ЭП, поскольку в установившемся режиме ток и момент двигателя определяются его механической нагрузкой.

На рис. 6.2, а для примера показаны типовые электромеханические и механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения, позволяющие регулировать (ограничивать) ток I и момент M при пуске с помощью добавочного резистора в цепи якоря. Резистор включается в цепь двигателя на период пуска (прямая 1), а затем с помощью схемы управления выводится (шунтируется) — прямая 2. Видно, что регулирование тока и момента производится ступенчато соответственно в пределах $I_1 \dots I_2$ и $M_1 \dots M_2$ и характеризуется невысокой точностью. Для повышения точности необходимо использовать несколько ступеней резисторов, в этом случае размах изменения тока I и момента M сузится. Данный способ, получивший название параметрического, характеризуется простотой реализации, но недостаточной точностью.

Изображенная на рис. 6.2, б характеристика является типовой при регулировании тока и момента в замкнутой системе «преобразователь — двигатель». За счет соответствующего воздействия на двигатель с помощью преобразователя формируется близкий к вертикали участок 3 характеристики. Точность регулирования

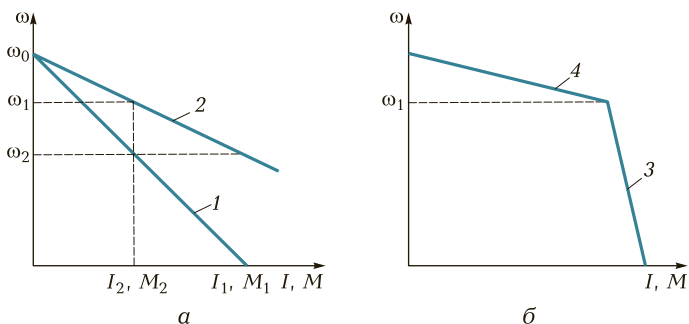


Рис. 6.2. Характеристики двигателя при ограничении тока и момента: *а* — с помощью резисторов; *б* — в системе «преобразователь—двигатель»; 1 — с резистором в цепи якоря; 2 — без резистора в цепи якоря; 3 и 4 — вертикальный и горизонтальный участки характеристики в замкнутой системе соответственно

тока и момента в таких ЭП является высокой (участок 3 характеристики в пределе может быть получен в виде вертикальной линии).

6.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для обеспечения выполнения ряда технологических процессов требуется перемещение исполнительных органов рабочих машин и механизмов в заданную точку пространства или плоскости и их установка там (фиксирование) с заданной точностью (например, роботы и манипуляторы, подъемно-транспортные механизмы, клапаны, задвижки, механизмы подачи станков и ряд других). Перемещение исполнительного органа из одной точки плоскости или пространства (позиции) в другую называется позиционированием и обеспечивается соответствующим регулированием положения вала двигателя.

В тех случаях, когда не требуются высокие точность и качество движения, позиционирование обычно обеспечивается с помощью путевых или конечных выключателей. Они устанавливаются в заданных позициях и при подходе к ним исполнительного органа производят отключение ЭП. Исполнительный орган тормозится и с некоторой точностью останавливается.

При необходимости обеспечения высокой точности позиционирования формируется оптимальный (или близкий к нему) график 3 движения ЭП $\varphi(t)$ (рис. 6.3). Такой типовой график движе-

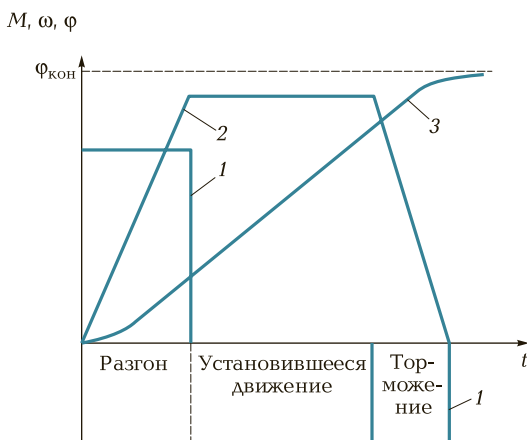


Рис. 6.3. Оптимальные графики движения при регулировании положения: 1 — график момента; 2 — график скорости; 3 — график угла поворота вала двигателя

ния состоит из трех участков — разгона, движения с установившейся скоростью и торможения, и предусматривает формирование графиков 1 и 2 соответственно момента двигателя $M(t)$ и его скорости $\omega(t)$. Отметим, что при небольших перемещениях участок установившегося движения может отсутствовать.

Точное позиционирование реализуется, как правило, в замкнутой системе «преобразователь — двигатель».

6.4. СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В зависимости от выполняемых функций, вида и числа регулируемых координат, степени автоматизации технологических процессов реализация ЭП может быть самой разнообразной (рис. 6.4).

Все ЭП подразделяются на неавтоматизированные и автоматизированные. Неавтоматизированные — это такие ЭП, управляет которыми с помощью простых средств человек (оператор). Он осуществляет пуск и остановку ЭП, изменение скорости и реверсирование в соответствии с заданным технологическим циклом. Для помощи оператору ЭП снабжен необходимыми элементами защиты, блокировок и сигнализации.

В автоматизированном ЭП операции управления в соответствии с требованиями технологического процесса выполняются

системой управления (см. рис. 5.1). На оператора возлагаются функции включения и отключения ЭП, наладка и контроль его работы (отметим, что при работе ЭП в общем комплексе автоматизированного производства внешние команды поступают от управляющих устройств более высокого уровня, например АСУ производством). Очевидно, что автоматизированный ЭП является более эффективным и экономически целесообразным, он позволяет освободить человека от утомительного и однообразного труда, повысить производительность рабочих машин и механизмов, а также качество выполняемых ими технологических процессов и операций. Именно по этой причине в теории ЭП и в настоящем учебнике основное внимание уделяется рассмотрению автоматизированных ЭП.

Все автоматизированные ЭП подразделяются, в свою очередь, на разомкнутые и замкнутые. Работа разомкнутого ЭП характеризуется тем, что все внешние возмущения (например, момент нагрузки M_c) влияют на его выходную координату, например скорость. Другими словами, разомкнутый ЭП не защищен от влияния внешних возмущений и поэтому не может обеспечить высокого качества регулирования координат, хотя и отличается простой схемой.

Разомкнутые ЭП обычно применяются для обеспечения пуска, торможения или реверса двигателей. В таких схемах ЭП используется информация о текущих значениях скорости, времени, тока (момента) или пути, что позволяет автоматизировать указанные процессы.

Замкнутый ЭП, как и любая система автоматического регулирования, может быть реализован либо по принципу отклонения с использованием обратных связей, либо по принципу компенса-

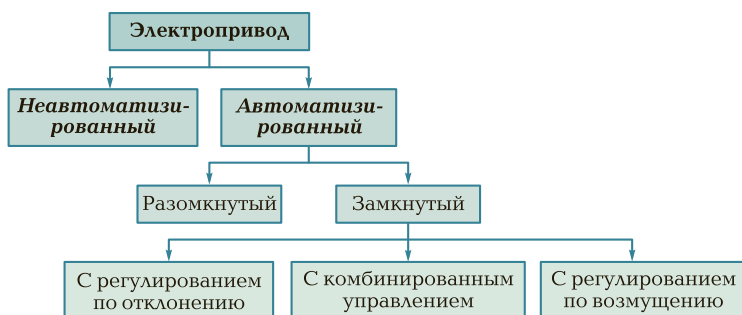


Рис. 6.4. Классификация электроприводов по степени их автоматизации

ции внешнего возмущения. Основным отличительным признаком замкнутого ЭП является полное или частичное устранение влияния внешнего возмущения на регулируемую координату, например, скорость такого ЭП может оставаться практически неизменной при возможных колебаниях момента нагрузки. В силу этого обстоятельства замкнутые ЭП обеспечивают более качественное управление движением исполнительных органов, хотя их схемы оказываются более сложными.

Для реализации принципа компенсации возмущающего воздействия дополнительный сигнал, пропорциональный возмущению, подается на вход ЭП вместе с сигналом задания. В результате суммарный сигнал обеспечивает такое управление ЭП, при котором осуществляется компенсация внешнего воздействия и устранение тем самым его влияния на регулируемую координату. Несмотря на все достоинства, этот способ не нашел широкого применения в ЭП из-за сложности реализации датчиков возмущающих воздействий, в частности момента нагрузки M_c .

Особенностью ЭП, построенного по принципу отклонения, является наличие цепи обратной связи. Информация о регулируемой координате подается на вход ЭП в виде сигнала обратной связи, который сравнивается с задающим сигналом, и полученный результирующий сигнал (его называют сигналом рассогласования, отклонения или ошибки) является управляющим сигналом для ЭП. Если под влиянием возмущающего воздействия начинает изменяться регулируемая координата, то за счет выбора направления и силы воздействия обратной связи произойдет соответствующее изменение режима работы ЭП и полное или частичное восстановление ее уровня, т. е. в таких системах регулирование ведется с учетом результата регулирования.

В замкнутых ЭП применяются все возможные виды обратных связей — положительные и отрицательные, линейные и нелинейные, жесткие и гибкие, а также реализуемые по виду регулируемой координаты — скорости, току, положению и др. В замкнутых ЭП могут использоваться несколько обратных связей по числу регулируемых координат. ЭП с обратными связями являются в настоящее время самыми распространенными системами, поскольку позволяют качественно и технически просто обеспечивать всю совокупность выполняемых ими функций. В некоторых случаях при очень высоких или специфических требованиях к качеству управления движением исполнительных органов создаются замкнутые комбинированные ЭП, в которых используются оба принципа управления.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие координаты (переменные) ЭП регулируются при управлении движением исполнительного органа?
2. Какими способами может осуществляться регулирование координат ЭП?
3. Какими показателями оценивается регулирование скорости?
4. В каких случаях и каким образом регулируется момент двигателя?
5. В каких случаях возникает необходимость регулирования (ограничения) тока двигателя?
6. В чем сущность регулирования положения ЭП?
7. Поясните структурное построение ЭП.
8. Какие существуют принципы построения замкнутых ЭП?
9. Назовите виды обратных связей.
10. Что такое автоматизированный ЭП?

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

7.1. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ И СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В ЭП используются двигатели постоянного тока независимого (ДПТНВ), последовательного (ДПТПВ) и смешанного (ДПТСВ) возбуждения, а также двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, которые по своим характеристикам близки к ДПТНВ.

Электроприводы с ДПТНВ являлись до недавнего времени основным видом регулируемого ЭП. Созданные на базе системы «управляемый выпрямитель — двигатель» (УВ — Д) замкнутые ЭП обеспечивают регулирование координат движения исполнительных органов рабочих машин и механизмов во всех режимах работы с высокими показателями качества.

Основная схема включения ДПТНВ показана на рис. 7.1, а, где приняты следующие обозначения: I и I_b — соответственно токи в цепях обмоток якоря и возбуждения, А; E — ЭДС якоря, В; ω и M — соответственно угловая скорость, рад/с, и момент, Н·м, двигателя; $R_{я} = r_{о.я} + r_{д.п} + r_{к.о} + r_{щ}$ — сопротивление якоря, состоящее из сопротивлений обмотки якоря, добавочных полюсов, компенсационной обмотки и щеточного контакта, Ом; $R_{о.в}$ — сопротивление обмотки возбуждения (ОВ), Ом; $L_{д}$ и $L_{о.в}$ — соответственно индуктивности обмоток якоря и возбуждения, Гн. На схеме показаны добавочные резисторы в цепях обмоток якоря $R_{д}$ и возбуждения $R_{в}$, а также отдельные источники питания обмоток якоря и возбуждения с напряжениями соответственно U и U_b .

При выводе уравнений для статических характеристик двигателя примем следующие допущения: реакция якоря не учитывается; момент на валу двигателя равен электромагнитному моменту. Тогда уравнения для напряжения, ЭДС якоря и электромагнитного момента будут иметь вид

$$U = E + IR; \quad (7.1)$$

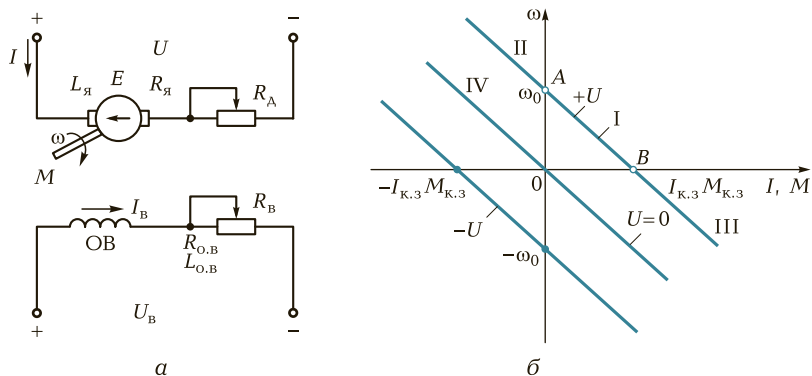


Рис. 7.1. Схема включения (а) и характеристики (б) двигателя постоянного тока независимого возбуждения

$$E = k\Phi\omega; \tag{7.2}$$

$$M = k\Phi I, \tag{7.3}$$

где $R = R_{я} + R_{\Delta}$ — полное сопротивление цепи якоря, Ом; Φ — магнитный поток, Вб; U — подводимое к якорю напряжение, В; $k = pN/(2\pi a)$ — конструктивный коэффициент двигателя; p — число пар полюсов; N — число активных проводников обмотки якоря; a — число параллельных ветвей обмотки якоря.

Подставляя (7.2) в (7.1), получим формулу для электромеханической характеристики $\omega(I)$:

$$\omega = (U - IR)/(k\Phi). \tag{7.4}$$

Формулу для механической характеристики $\omega(M)$ ДПТНВ получим из (7.4) с использованием выражения (7.3):

$$\omega = U/(k\Phi) - MR/(k\Phi)^2. \tag{7.5}$$

В соответствии с (7.4) и (7.5) электромеханическая и механическая характеристики ДПТНВ представляют собой линейные зависимости угловой скорости (далее скорости) от тока и момента, вид которых для разных полярностей питающего якоря напряжения показан на рис. 7.1, б. Здесь электромеханическая и механическая характеристики совмещены, что в соответствии с (7.3) справедливо в случае $k\Phi = \text{const}$. Их характерными точками являются точка A холостого хода, в которой $\omega = \omega_0$, а $I = M = 0$, и точка B короткого замыкания, где $\omega = 0$, а $I = I_{к.з}$ и $M = M_{к.з}$. Отметим, что режим ко-

роткого замыкания для электрической машины соответствует неподвижному состоянию якоря при поданном на двигатель напряжении, а не замыканию его электрических цепей между собой или на корпус. Режим короткого замыкания называется также пусковым режимом, поскольку является начальным при включении (пуске) двигателя.

Уравнения (7.4) и (7.5) можно записать в сокращенной форме:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega, \tag{7.6}$$

где ω_0 — скорость идеального холостого хода двигателя,

$$\omega_0 = U / (k\Phi); \tag{7.7}$$

$\Delta\omega$ — изменение угловой скорости относительно скорости идеального холостого хода,

$$\Delta\omega = IR / (k\Phi) = MR / (k\Phi)^2. \tag{7.8}$$

На рис. 7.1, б показана также характеристика ДПТНВ, уравнения которой получают из (7.4) и (7.5) при $U = 0$:

$$\omega = -IR / (k\Phi); \tag{7.9}$$

$$\omega = -MR / (k\Phi)^2. \tag{7.10}$$

Зависимости $\omega(I)$ и $\omega(M)$ при $U = 0$ также являются линейными. Схема динамического торможения, при котором ДПТНВ имеет такую характеристику, показана на рис. 7.2 (она может называться также схемой генератора, работающего на автономную нагрузку R_A).

Выражения (7.4) и (7.5) позволяют назвать основные способы реализации искусственных характеристик ДПТНВ, используемых для регулирования координат ЭП. К ним относятся изменение сопротивления добавочного резистора в цепи якоря R_A , магнитного потока Φ и подводимого к якорю напряжения U . Отметим, что значения входящих в эти выражения тока и момента определяются только механической нагрузкой двигателя M_c и не могут быть установлены произвольно.

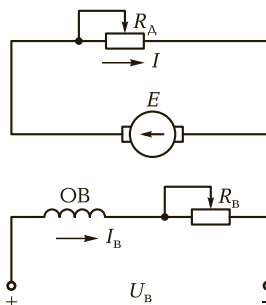


Рис. 7.2. Схема динамического торможения двигателя

Задача 7.1*. Рассчитать и построить естественные характеристики ДПТНВ, используя следующие его паспортные (номинальные) данные: $P_{\text{ном}} = 300 \text{ кВт}$; $U_{\text{ном}} = 440 \text{ В}$; $n_{\text{ном}} = 1250 \text{ мин}^{-1}$; $I_{\text{ном}} = 750 \text{ А}$.

Для построения характеристик, представляющих собой прямые линии, достаточно рассчитать координаты двух точек: номинального режима и холостого хода.

Найдем номинальные скорость и момент двигателя:

$$\omega_{\text{ном}} = 2\pi n_{\text{ном}}/60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1250/60 = 131 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/\omega_{\text{ном}} = 300\,000/131 = 2\,306 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Предварительно определим по (7.3)

$$k\Phi_{\text{ном}} = M_{\text{ном}}/I_{\text{ном}} = 2\,306/750 = 3,08 \text{ В} \cdot \text{с},$$

тогда скорость идеального холостого хода

$$\omega_0 = U_{\text{ном}}/(k\Phi_{\text{ном}}) = 440/3,08 = 144 \text{ рад/с}.$$

По координатам точек холостого хода ($\omega = \omega_0$, $I = M = 0$) и номинального режима ($\omega = \omega_{\text{ном}}$, $I = I_{\text{ном}}$, $M = M_{\text{ном}}$) построим естественные электро-механическую $\omega(I)$ и механическую $\omega(M)$ характеристики.

Задача 7.2. Рассчитать и построить характеристики $\omega(I)$ и $\omega(M)$ при динамическом торможении и добавочном сопротивлении цепи якоря $R_{\Delta} = 0,01 \text{ Ом}$. Номинальные данные ДПТНВ см. в задаче 7.1.

7.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Электрическая машина обладает так называемым свойством обратимости, т. е. она может работать как двигателем, преобразуя электрическую энергию в механическую, так и генератором, осуществляя обратное преобразование энергии. При этом переход из одного режима в другой может происходить без изменения схемы включения. При работе двигателей в генераторном режиме на валу электрической машины создается тормозной момент, обеспечивающий интенсивное принудительное замедление (торможение) движения ЭП и, следовательно, расширяющий его возможности по управлению движением исполнительного органа (в частности, при его торможении и реверсе).

Энергетический режим работы электрической машины можно определить исходя из взаимных направлений двух переменных: электрических (ЭДС E и тока I) или механических (момента M и скорости ω). При одинаковых направлениях скорости и момента

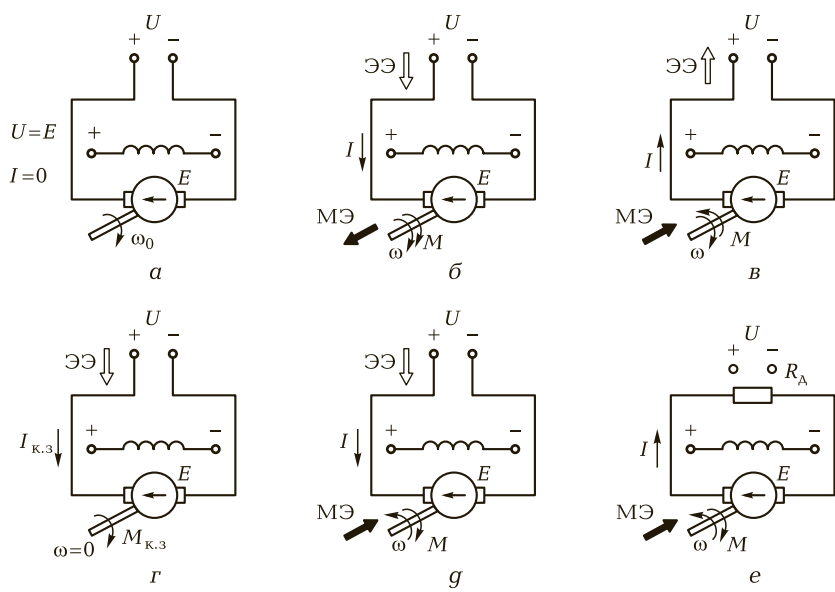


Рис. 7.3. Схемы, иллюстрирующие энергетические режимы работы двигателя:

а — режим холостого хода; *б* — двигательный режим; *в* — генераторный режим параллельно с сетью; *г* — режим короткого замыкания; *д* — генераторный режим последовательно с сетью; *е* — генераторный режим независимо от сети

и разных направлениях тока и ЭДС имеет место двигательный режим работы, а при противоположных направлениях скорости и момента и одинаковых направлениях ЭДС и тока — генераторный. Граничными между двигательным и генераторным являются режимы холостого хода и короткого замыкания, в которых одна электрическая и одна механическая переменные равны нулю. При холостом ходе нулю равны ток и момент, а при коротком замыкании — ЭДС и скорость.

Рассмотрим режимы работы двигателя (рис. 7.3) на различных участках его характеристик (см. рис. 7.1, б) при положительной полярности напряжения U .

Режим холостого хода (точка А). Двигатель не получает энергии ни из электрической сети (за исключением электроэнергии на возбуждение), ни с вала. В этом режиме $I = 0$, $E = U = k\Phi\omega_0$, $M = 0$, $\omega = \omega_0$ (рис. 7.3, а).

Двигательный режим (участок I характеристики на рис. 7.1, б) в диапазоне $0 < \omega < \omega_0$, т. е. в первом квадранте, где ω и M совпадают по направлению. В этом режиме $E < U$, ток $I = (U - E)/R$ со-

впадает по направлению с напряжением U и не совпадает с ЭДС, электрическая энергия (ЭЭ) поступает из сети, а механическая энергия (МЭ) с вала двигателя передается исполнительному органу (рис. 7.3, б).

Генераторный режим работы параллельно с сетью или торможение с рекуперацией энергии в сеть (участок II характеристики на рис. 7.1, б). На этом участке $\omega > \omega_0$, поэтому ЭДС больше напряжения сети, ток и момент изменяют свои направления на противоположные. Двигатель получает механическую энергию от рабочей машины и отдает ее (рекуперировать) в виде электроэнергии в сеть (рис. 7.3, в).

Режим короткого замыкания возникает при $\omega = 0$ и $E = 0$. В этом режиме согласно (7.1) $I = I_{к.з} = U/R$, электрическая энергия, поступающая из сети, рассеивается в виде тепла в резисторах якорной цепи. Механическая энергия с вала ДПТ не отдается, так как $\omega = 0$ (рис. 7.3, г).

Режим генератора при его последовательном соединении с сетью, или **торможение противовключением**, наступает при $\omega < 0$ (участок III характеристики на рис. 7.1, б). За счет изменения направления скорости ЭДС также меняет свою полярность. Ток в якоре совпадает по направлению с напряжением и ЭДС и определяется их суммарным действием, т. е. $I = (U + E)/R$. В результате электроэнергия, поступающая из сети и вырабатываемая самим двигателем за счет механической энергии рабочей машины, рассеивается в виде тепла в резисторах цепи якоря (рис. 7.3, г).

Режим автономного генератора, или **динамическое торможение**, возникает при включении двигателя по схеме рис. 7.2. В этом случае ток в якоре протекает под действием ЭДС и совпадает с ней по направлению. Электроэнергия вырабатывается за счет поступающей с вала механической энергии рабочей машины и рассеивается в виде тепла в резисторах якорной цепи (рис. 7.3, е).

Таким образом, торможение ЭП реализуется при трех разновидностях генераторного режима работы ДПТНВ.

Эффективность электромеханического преобразования энергии двигателя оценивается коэффициентом полезного действия (КПД), который определяется отношением механической мощности на его валу $P_{\text{мех}} = M\omega$ к потребляемой из сети электрической мощности $P_{\text{эл}} = UI + U_{\text{в}}I_{\text{в}}$:

$$\eta = P_{\text{мех}}/P_{\text{эл}} = P_{\text{мех}}/(P_{\text{мех}} + \Delta P),$$

где ΔP — потери мощности в двигателе.

7.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ РЕЗИСТОРОВ В ЦЕПИ ЯКОРЯ

Этот способ применяется при невысоких требованиях к показателям качества регулирования скорости, отличаясь в то же время универсальностью и простотой реализации (см. рис. 7.1, а).

Из (7.7) видно, что скорость ω_0 не зависит от R_A , а наклон характеристик, как это следует из (7.8), тем больше, чем больше R_A . Этот краткий анализ позволяет изобразить семейство механических (электромеханических) характеристик ДПТНВ в виде совокупности линий (рис. 7.4) различного наклона (жесткости), проходящих через одну и ту же точку на оси скорости с ординатой ω_0 . Характеристика 1 соответствует случаю, когда $R_A = 0$ и является естественной, искусственные характеристики 2...4 построены при наличии в цепи якоря резисторов с сопротивлениями соответственно $R_{A1} < R_{A2} < R_{A3}$.

Оценим данный способ регулирования скорости по основным показателям, рассмотренным в подразд. 6.1. Диапазон регулирования скорости небольшой (обычно 2...3). Причина этого заключается в снижении жесткости характеристик по мере увеличения R_A . Направление регулирования скорости — вниз от естественной характеристики. Плавность регулирования скорости определяется характером изменения R_A . Если это сопротивление изменяется плавно, то данный способ обеспечивает плавное регулирование скорости. Чаще же рассматриваемый способ обеспечивает ступенчатое регулирование скорости. Стабильность скорости снижается по мере увеличения диапазона регулирования, так как уменьшается жесткость регулировочных характеристик.

Экономичность регулирования скорости оценим, сопоставив требуемые капитальные затраты на реализацию данного способа и сто-

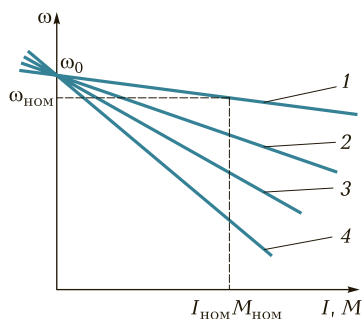


Рис. 7.4. Характеристики двигателя при различных сопротивлениях добавочного резистора в цепи якоря:

1 — $R_A = 0$; 2 — R_{A1} ; 3 — R_{A2} ; 4 — R_{A3}

имость потерь мощности при регулировании. Капитальные затраты на приобретение добавочных резисторов небольшие, так как их стоимость невелика. В то же время потери мощности и соответственно непроизводительный расход ЭП электрической энергии и ее стоимость оказываются существенными. Покажем это, оценив потери мощности в цепи якоря — основную долю потерь в двигателе.

Потери мощности в цепи якоря $\Delta P_{\text{я}}$ определяются разностью мощностей: потребляемой из сети $P_1 = P_{\text{эл}} = UI$ и полезной механической на валу $P_2 = P_{\text{мех}} = M\omega$. С учетом соотношений (7.3) и (7.7)

$$\Delta P_{\text{я}} = UI - M\omega = k\Phi\omega_0 I - k\Phi I\omega = k\Phi\omega_0 I(\omega_0 - \omega)/\omega_0 = P_1 \delta, \quad (7.11)$$

где $\delta = (\omega_0 - \omega)/\omega_0 = \Delta\omega/\omega_0$ — относительный перепад скорости.

Из (7.11) видно, что уже при снижении скорости в два раза по сравнению со скоростью идеального холостого хода ω_0 , т.е. при $\delta = 0,5$ и $D \approx 2$, половина всей потребляемой из сети мощности P_1 теряется в якоре двигателя — КПД двигателя не превышает 50%. При дальнейшем увеличении диапазона регулирования КПД снижается в еще большей степени.

Допустимая нагрузка при работе двигателя на искусственных характеристиках определяется по предельно допустимому моменту, который он может развивать, не перегреваясь выше нормы. Так как при данном способе регулирования магнитный поток не изменяется и равен номинальному, то при подстановке в (7.3) $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$ и $I = I_{\text{ном}}$ получим:

$$M_{\text{доп}} = k\Phi_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = M_{\text{ном}}. \quad (7.12)$$

Выражение (7.12) показывает, что при рассматриваемом способе регулирования скорости ДПТНВ может без перегрева работать на любой искусственной характеристике с моментом нагрузки, равным номинальному. Отметим, что способы регулирования скорости, при которых $M_{\text{доп}} = M_{\text{ном}}$, в теории ЭП называются регулированием скорости при постоянном моменте.

Сделанный вывод о характере допустимой нагрузки справедлив для ДПТНВ, у которых охлаждение не ухудшается по мере снижения скорости. В тех же случаях, когда ДПТНВ охлаждается с помощью вентилятора на своем валу, момент нагрузки при снижении скорости необходимо также уменьшить из-за ухудшения вентиляции двигателя.

Для регулирования скорости движения исполнительных органов рассмотренный способ используется при небольших диапазонах регулирования или кратковременной работе двигателя на пониженных скоростях.

7.4. РАСЧЕТ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ В ЦЕПИ ЯКОРЯ

В теории ЭП разработано несколько методов расчета регулировочных резисторов в цепи якоря.

Допустим, что известна естественная электромеханическая или механическая характеристика 1 двигателя (рис. 7.5) и его паспортные данные. Требуется рассчитать сопротивление резистора R_{Δ} , при включении которого в цепь якоря желаемая искусственная характеристика 2 пройдет через точку А с заданными координатами $(\omega_{и}, I_{и})$ или $(\omega_{и}, M_{и})$. Отметим, что эта реостатная характеристика может быть задана как по условиям регулирования скорости, так и для ограничения тока и момента двигателя в переходных процессах.

Метод пропорций основан на использовании формулы (7.8) для определения перепада скорости. Запишем отношение перепадов скорости при токе $I_{и}$ и (или) моменте $M_{и}$ на естественной $\Delta\omega_e$ и желаемой искусственной $\Delta\omega_{и}$ характеристиках:

$$\Delta\omega_e / \Delta\omega_{и} = I_{и} R_{я} / (I_{н} (R_{я} + R_{\Delta})) = R_{я} / (R_{я} + R_{\Delta}), \quad (7.13)$$

откуда

$$R_{\Delta} = R_{я} / (\Delta\omega_{и} / \Delta\omega_e - 1). \quad (7.14)$$

Полученная формула позволяет рассчитать сопротивление добавочных резисторов при расположении заданной точки в любом квадранте.

Метод отрезков в отличие от метода пропорций не требует использования данных о собственном сопротивлении якоря двигателя-

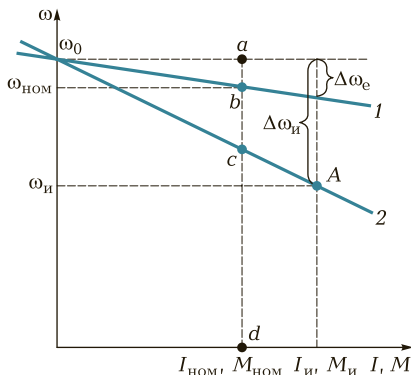


Рис. 7.5. Характеристики двигателя к расчету резисторов:

1 — естественная; 2 — реостатная

ля, которое не всегда указывается в паспорте, а позволяет определить его по известной естественной характеристике.

Для получения расчетной формулы этого метода запишем согласно (7.4) выражение для скорости ДПТ на заданной искусственной характеристике (рис. 7.5) при номинальных токе, моменте, магнитном потоке и напряжении:

$$\omega_{и} = U_{\text{НОМ}} / ((k\Phi_{\text{НОМ}})(1 - I_{\text{НОМ}}R/U_{\text{НОМ}})), \quad (7.15)$$

или с учетом (7.7)

$$\omega_{и} = \omega_0(1 - R/R_{\text{НОМ}}) \quad (7.16)$$

где $R_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}}/I_{\text{НОМ}}$ — так называемое номинальное сопротивление, являющееся базовой величиной при расчетах, Ом.

Из (7.16) получим соотношение

$$R/R_{\text{НОМ}} = (\omega_0 - \omega_{и})/\omega_0 = \delta, \quad (7.17)$$

которое отражает важное свойство ДПТНВ: относительный перепад скорости $\delta = \Delta\omega/\omega_0$ равен относительному активному сопротивлению цепи якоря $R/R_{\text{НОМ}}$. Отметим, что это свойство характерно и для других типов двигателей (в частности, асинхронных).

Соотношение (7.17) удобно решать с помощью характеристик, показанных на рис. 7.5, где a, b, c, d — характерные точки. Отметим также, что $(\omega_0 - \omega_{и}) = \Delta\omega = ac$, $\omega_0 = ad$. Тогда

$$R = R_{\text{НОМ}}\Delta\omega/\omega_0 = R_{\text{НОМ}}ac/ad; \quad (7.18)$$

$$R_{\Delta} = R_{\text{НОМ}}bc/ad; \quad (7.19)$$

$$R_{\text{я}} = R_{\text{НОМ}}ab/ad. \quad (7.20)$$

Таким образом, для нахождения R_{Δ} следует сначала по характеристикам двигателя определить длину отрезков bc и ad при номинальном токе или моменте, рассчитать номинальное сопротивление $R_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}}/I_{\text{НОМ}}$, а затем воспользоваться формулой (7.19).

При расчете регулировочных резисторов в большинстве случаев необходимо знать собственное сопротивление якоря $R_{\text{я}}$, которое можно определить по каталогам, найти в справочной литературе, где приводятся обобщенные зависимости относительного сопротивления якоря $R_{\text{я}}^* = R_{\text{НОМ}}/R_{\text{НОМ}}$ от мощности $P_{\text{НОМ}}$ или экспериментально посредством измерения сопротивления между щетками двигателя, рассчитать по приближенной формуле для номинальных паспортных данных:

$$R_{\text{я}} \approx 0,5U_{\text{НОМ}}(1 - \eta_{\text{НОМ}})/I_{\text{НОМ}} = 0,5R_{\text{НОМ}}(1 - \eta_{\text{НОМ}}), \quad (7.21)$$

где $\eta_{\text{ном}}$ — номинальный КПД двигателя, а при наличии экспериментально полученной электромеханической или механической характеристики по методу отрезков с помощью формул (7.3) и (7.4), записанных для точки номинального режима.

Задача 7.3. ДПТНВ типа ПБСТ-53 имеет следующие паспортные данные: $P_{\text{ном}} = 4,8$ кВт; $n_{\text{ном}} = 1500$ мин⁻¹; $U_{\text{ном}} = 220$ В; $I_{\text{ном}} = 24,2$ А; $R_{\text{я}} = 0,38$ Ом; $I_{\text{в,ном}} = 0,8$ А. Определить сопротивление резистора, включение которого обеспечит прохождение искусственной характеристики через точку с координатами $\omega_{\text{и}} = 90$ рад/с, $M_{\text{и}} = 25$ Н·м.

Используем метод пропорций, предварительно определив номинальные скорость и момент двигателя:

$$\omega_{\text{ном}} = 2\pi n_{\text{ном}}/60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1500/60 = 157 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/\omega_{\text{ном}} = 4800/157 = 30,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Зная эти данные, найдем

$$k\Phi_{\text{ном}} = M_{\text{ном}}/I_{\text{ном}} = 30,6/24,2 = 1,3 \text{ В} \cdot \text{с};$$

скорость холостого хода

$$\omega_0 = U_{\text{ном}}/(k\Phi_{\text{ном}}) = 220/1,3 = 169 \text{ рад/с};$$

перепад скорости на естественной характеристике при моменте $M_{\text{и}} = 25$ Н·м

$$\Delta\omega_{\text{е}} = M_{\text{и}}R_{\text{я}}/(k\Phi_{\text{ном}})^2 = 25 \cdot 0,38/1,3^2 = 6 \text{ рад/с}$$

и перепад скорости на искусственной характеристике при том же моменте

$$\Delta\omega_{\text{и}} = \omega_0 - \omega_{\text{и}} = 169 - 90 = 79 \text{ рад/с}.$$

Теперь найдем сопротивление добавочного резистора по (7.14):

$$R_{\text{д}} = R_{\text{я}}(\Delta\omega_{\text{и}}/\Delta\omega_{\text{е}} - 1) = 0,38(79/6 - 1) = 4,62 \text{ Ом}.$$

Задача 7.4. Для условия задачи 7.3 найти сопротивление резистора методом отрезков.

Задача 7.5. Определить, каким должно быть сопротивление добавочного резистора по сравнению с сопротивлением якоря двигателя, чтобы перепад скорости при заданном токе увеличился в три раза.

7.5. РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА И МОМЕНТА ПРИ ПУСКЕ, ТОРМОЖЕНИИ И РЕВЕРСЕ ДВИГАТЕЛЯ

Ранее уже отмечалось, что ток в якоре ДПТНВ в переходных режимах не должен превосходить некоторых допустимых значений ($(2 \dots 3)I_{\text{ном}}$ для двигателей обычного исполнения). В про-

стейших случаях регулирование (ограничение) тока и тем самым момента осуществляется введением в цепь якоря добавочного резистора R_{Δ} . Характеристики двигателя для определения скачков тока и момента в переходных режимах показаны на рис. 7.6.

Пуск двигателя сначала происходит по искусственной характеристике 1 с резистором R_{Δ} в цепи якоря, называемым пусковым. В момент включения двигателя его ток и момент ограничиваются до заданного (допустимого) уровня $I_1 = I_{\text{доп}}$ и $M_1 = M_{\text{доп}}$. По мере увеличения скорости и соответственно ЭДС двигателя ток в якоре снижается, и при скорости ω_1 резистор может быть замкнут (выведен из цепи якоря). Двигатель переходит на работу по естественной характеристике 2, при этом броски тока и момента также не превышают заданного уровня. Завершается пуск двигателя после достижения им скорости $\omega_{\text{уст}}$, определяемой точкой пересечения характеристик двигателя 2 и исполнительного органа 3.

Динамическое торможение, реализуемое по схеме, показанной на рис. 7.2, происходит по характеристике 4 (рис. 7.6) замыканием якоря на резистор R_{Δ} . Его сопротивление находится по заданным

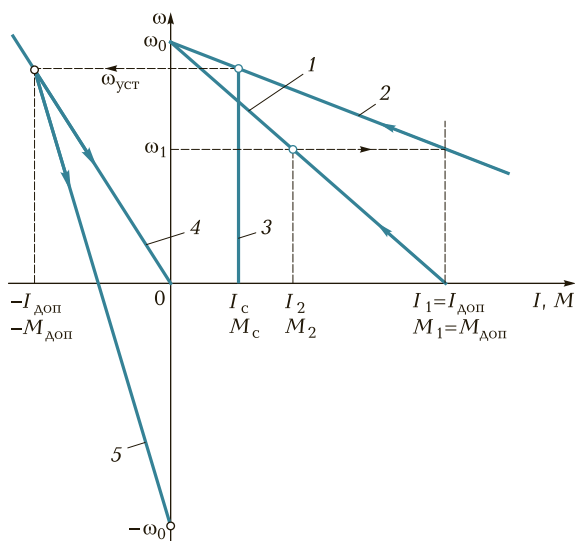


Рис. 7.6. Характеристики при ограничении тока и момента двигателя в переходных процессах:

1 — реостатная при пуске; 2 — естественная; 3 — исполнительного органа; 4 — реостатная при динамическом торможении; 5 — реостатная при реверсе

значениям $I_{\text{доп}}$ или $M_{\text{доп}}$, определяемым замедлением ЭП или условиями коммутации двигателя.

Реверс и торможение противовключением ДПТНВ, осуществляемые изменением полярности напряжения якоря или обмотки возбуждения, происходят по характеристике 5 при включении в цепь якоря резистора R_A .

Иногда для регулирования тока и момента в цепь якоря вводится регулируемый резистор, что позволяет реализовать две или более искусственные характеристики, сузить пределы изменений тока и момента в переходных процессах и тем самым повысить точность их регулирования. В этих случаях резистор секционируется на соответствующее число ступеней, которые закорачиваются последовательно по мере разбега или торможения двигателя.

Число ступеней m добавочного резистора (или, что то же самое, число используемых искусственных характеристик) связано с пределами изменения тока в якоре $I_1 = I_{\text{доп}}$ и током переключения I_2 следующим соотношением:

$$m = \lg(I_2/I_1) / \lg(I_1 R_A / U). \quad (7.22)$$

Совокупность двух или более искусственных характеристик, используемых при пуске двигателя, называется пусковой диаграммой. При ее расчете и построении заданными параметрами являются допустимые ток $I_{\text{доп}}$ или момент $M_{\text{доп}}$, момент нагрузки M_c , пределы изменения тока (момента) или число искусственных характеристик m , соответствующее числу ступеней пускового резистора.

Рассмотрим порядок построения пусковой диаграммы и схему включения пускового резистора (рис. 7.7), если заданы $I_{\text{доп}}$, M_c и число характеристик $m = 2$ (отметим, что эти характеристики могут быть использованы и для регулирования скорости).

Сначала строится естественная характеристика 1 двигателя и проводится вертикальная линия, соответствующая абсциссе $I_1 = I_{\text{доп}}$ или $M = M_{\text{доп}}$. Через точки a и b с координатами $(\omega_0, 0)$ и $(0, I_1)$ проводится искусственная характеристика 3, соответствующая включению в цепь якоря обеих ступеней пускового резистора R_{A1} и R_{A2} . Затем определяется ток переключения по приближенному соотношению $I_2 = (1,1 \dots 1,2)I_c$ и строится вертикальная линия, соответствующая этому току. Через точку с пересечения этой линии с характеристикой 3 проводится горизонтальная линия до пересечения в точке d с вертикалью, имеющей абсциссу I_1 . Через точки a и d проводится искусственная характеристика 2, а через точку e — еще одна горизонталь до пересечения в точке f с естественной характеристикой 1.

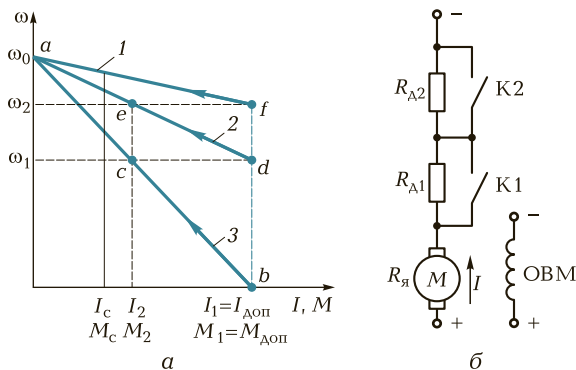


Рис. 7.7. Пусковая диаграмма двигателя (а) и схема включения пусковых резисторов (б):

1 — естественная характеристика двигателя; 2 и 3 — реостатные характеристики двигателя

Для точного попадания точек c, d, e, f на вертикали с абсциссами I_1 и I_2 производится подбор значения тока I_2 .

Пуск двигателя начинается по характеристике 3. При скорости ω_1 , когда ток снизится до значения I_2 , ключом $K1$ закорачивается ступень R_{A1} и двигатель уже по характеристике 2 продолжает свой разбег. При скорости ω_2 ключом закорачивается ступень R_{A2} и двигатель начинает работать на естественной характеристике 1.

Для осуществления динамического торможения двигатель включается по схеме, показанной на рис. 7.2, и при этом переходит с работы на характеристике 2 на работу по характеристике 4 (см. рис. 7.6). Торможение противовключением, или реверс двигателя, осуществляется изменением полярности напряжения на якоре или обмотке возбуждения (последнее применяется очень редко). При этом двигатель переходит с работы по характеристике 2 на работу по характеристике 5 (см. рис. 7.6).

В качестве ключей для указанных переключений и шунтирования резисторов обычно используются контакторы. Релейно-контакторные схемы управления, обеспечивающие описанный порядок пуска ДПТ, будут рассмотрены далее.

Расчет сопротивлений резисторов, которые позволяют получить показанные на рис. 7.6 и 7.7 характеристики, производится по формулам (7.14) и (7.19). Кроме того, могут использоваться формулы, позволяющие непосредственно находить сопротивления по заданным (допустимым) току и моменту при пуске, торможении и реверсе. Исходным в этом случае является максимально

допустимый ток $I_{\text{доп}}$, который определяется допустимым моментом $M_{\text{доп}}$ или условиями пуска, реверса и торможения двигателя.

Сопротивление добавочного резистора при пуске в одну ступень (см. рис. 7.6) рассчитывается по (7.1) при $E = 0$:

$$R_{\Delta} = U/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}}. \quad (7.23)$$

Сопротивление добавочного резистора при динамическом торможении

$$R_{\Delta} = E/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}} \approx U/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}}. \quad (7.24)$$

Сопротивление добавочного резистора при реверсе или торможении противовключением

$$R_{\Delta} = (U + E)/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}} \approx 2U/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}}. \quad (7.25)$$

Задача 7.6*. Для двигателя типа ПБСТ-53 (см. задачу 7.3) определить сопротивления резисторов, включение которых ограничит ток при пуске и торможении противовключением до уровня $I_{\text{доп}} = 3I_{\text{ном}}$.

Определим сопротивление пускового резистора по (7.23):

$$R_{\Delta} = U/I_{\text{доп}} - R = 220/(3 \cdot 24,2) - 0,38 = 2,65 \text{ Ом}.$$

Сопротивление резистора, используемого при торможении, определим по (7.25):

$$R_{\Delta} = 2U/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}} = (2 \cdot 220)/(3 \cdot 24,2) - 0,38 = 5,7 \text{ Ом}.$$

Задача 7.7. Для двигателя типа ПБСТ-53 (см. задачу 7.3) построить пусковую диаграмму при следующих условиях: $m = 2$; $I_{\text{доп}} = 2,8I_{\text{ном}}$; $M_{\text{с}} = 30 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Рассчитать сопротивления добавочных резисторов.

Задача 7.8. Для двигателя типа ПБСТ-53 (см. задачу 7.3) определить число характеристик m пусковой диаграммы, при котором изменение тока будет происходить в пределах от $I_1 = 60 \text{ А}$ до $I_2 = 10 \text{ А}$.

Задача 7.9. Рассчитать сопротивление резистора, при котором характеристика двигателя (см. задачу 7.3) в режиме динамического торможения пройдет через точку с координатами $\omega_{\text{и}} = 100 \text{ рад/с}$, $I_{\text{и}} = -20 \text{ А}$.

7.6. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Изменение магнитного потока используется преимущественно для регулирования скорости. Этот способ находит широкое применение в ЭП вследствие простоты его реализации и экономич-

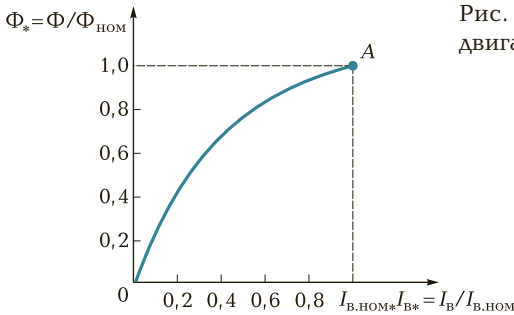


Рис. 7.8. Кривая намагничивания двигателя постоянного тока

ности, так как регулирование осуществляется в относительно маломощной цепи возбуждения двигателя и не сопровождается большими потерями мощности.

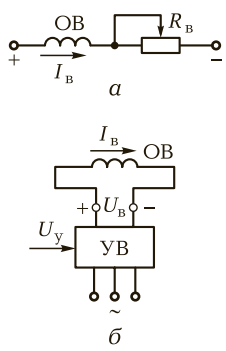
Магнитный поток при регулировании скорости обычно уменьшают по сравнению с номинальным (точка A на кривой намагничивания рис. 7.8) за счет снижения тока возбуждения, так как его увеличение выше номинального вызывает дополнительный нагрев обмотки возбуждения. Из отмеченного следует вывод, что двигатель рассчитывается и конструируется таким образом, чтобы его магнитная система была близка к насыщению, поэтому увеличение тока возбуждения не приводит к заметному увеличению магнитного потока.

Регулирование тока в цепи возбуждения может осуществляться или с помощью добавочного резистора $R_{в}$ (рис. 7.9, а), или изменением напряжения питания обмотки возбуждения, например с помощью управляемого выпрямителя УВ (рис. 7.9, б), выходное напряжение которого $U_{в}$ регулируется по сигналу управления $U_{у}$. Вторая схема применяется для регулирования в широких пределах тока возбуждения мощных двигателей, работающих в замкнутых структурах ЭП. При использовании в ней реверсивных управляемых выпрямителей обеспечивается также изменением направления тока возбуждения.

В соответствии с (7.7) уменьшение магнитного потока приводит к увеличению скорости идеального холостого хода ω_0 . Ток короткого замыкания $I_{к.з} = U/R_{я}$, т.е. от магнитного потока не зависит и при его варьировании будет оставаться неизменным. Таким образом, электромеханические характеристики при различных значениях магнитного потока $\Phi_{ном} > \Phi_1 > \Phi_2$ будут иметь вид прямых 1...3, показанных на рис. 7.10, а.

Момент короткого замыкания $M_{к.з} = k\Phi I_{к.з}$, т.е. при уменьшении магнитного потока Φ он будет также снижаться, так как

Рис. 7.9. Схемы регулирования тока возбуждения с помощью резистора (а) и управляемого выпрямителя (б)



$I_{к.з} = \text{const}$. Значит, механические характеристики двигателя будут иметь вид прямых, показанных на рис. 7.10, б.

Показатели данного способа регулирования скорости ДПТНВ следующие: диапазон регулирования 3...4; направление регулирования — вверх от естественной характеристики; плавность регулирования определяется плавностью регулирования тока возбуждения; стабильность скорости достаточно высокая, хотя она и снижается при уменьшении магнитного потока. Способ экономичен, так как регулирование скорости не сопровождается значительными потерями мощности, а реализация его не требует больших капитальных затрат.

Допустимую нагрузку ДПТ при его работе на искусственных характеристиках определим по (7.3), полагая $I = I_{в.ном}$:

$$M_{доп} = k\Phi_{и}I_{ном}, \tag{7.26}$$

где $\Phi_{и}$ — магнитный поток на искусственной характеристике.

Так как при данном способе регулирования $\Phi_{и} < \Phi_{ном}$, то и $M_{доп} \ll M_{ном}$, т.е. двигатель по условиям нагрева не может быть нагружен на искусственных характеристиках номинальным моментом.

Для определения допустимой нагрузки двигателя сделаем дополнительный расчет. Запишем выражение для ЭДС якоря на

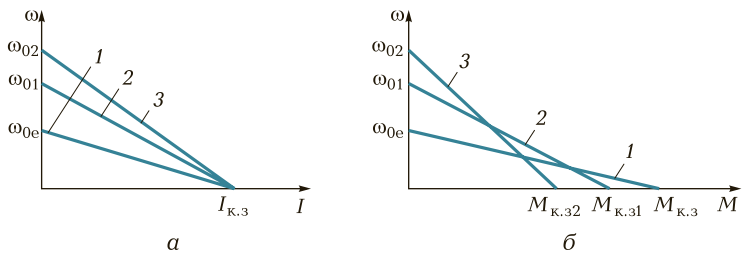


Рис. 7.10. Характеристики двигателя при уменьшении магнитного потока электромеханические (а) и механические (б):

1 — естественная; 2 и 3 — при уменьшении магнитного потока

естественной и искусственной характеристиках при номинальном токе:

$$\begin{aligned} E_e &= k\Phi_{\text{НОМ}}\omega_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}}R_{\text{я}}; \\ E_{\text{и}} &= k\Phi_{\text{и}}\omega_{\text{и}} = U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}}R_{\text{я}}. \end{aligned}$$

Так как $U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}}R_{\text{я}} = \text{const}$, то из равенства $E_e = E_{\text{и}}$ вытекает следующее соотношение:

$$\Phi_{\text{и}} = \Phi_{\text{НОМ}}\omega_{\text{НОМ}}/\omega_{\text{и}}, \quad (7.27)$$

где $\omega_{\text{и}}$ — скорость на искусственной характеристике при $I = I_{\text{НОМ}}$.

Подставляя (7.27) в (7.26), получаем

$$M_{\text{доп}}\omega_{\text{и}} = M_{\text{НОМ}}\omega_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} = \text{const}. \quad (7.28)$$

Как видно из (7.28), при работе двигателя на искусственных характеристиках он может быть нагружен на свою номинальную мощность. Объясняется это тем, что хотя момент нагрузки при уменьшении магнитного потока снижается, но одновременно повышается скорость двигателя, а их произведение, определяющее механическую мощность, остается неизменным и равным номинальной мощности. Таким образом, регулирование скорости изменением магнитного потока целесообразно при постоянной механической мощности нагрузки, что обеспечивает полное его использование при работе на всех искусственных характеристиках.

Задача 7.10. Паспортные данные ДПТНВ приведены в задаче 7.3. Определить магнитный поток и ток возбуждения, при которых искусственная механическая характеристика пройдет через точку с координатами $\omega_{\text{и}} = 250$ рад/с, $M_{\text{и}} = 15$ Н·м.

Решая (7.5) с учетом того, что $R = R_{\text{я}}$ и $U = U_{\text{НОМ}}$, получим

$$\omega_{\text{и}}(k\Phi_{\text{и}})^2 - U_{\text{НОМ}}k\Phi_{\text{и}} + M_{\text{и}}R_{\text{я}} = 0.$$

Это уравнение имеет два решения: $k\Phi_{\text{и}1} = 0,85$ В·с; $k\Phi_{\text{и}2} = 0,027$ В·с. Целесообразно выбрать большее из двух полученных значений, так как в этом случае момент двигателя $M_{\text{и}}$ обеспечивается при меньшем токе якоря.

Для определения тока возбуждения $I_{\text{в.и}}$ рассчитаем относительное значение найденного магнитного потока: $(k\Phi_{\text{и}})/(k\Phi_{\text{НОМ}}) = \Phi_{\text{и}}^* = 0,85/1,3 = 0,61$, зная который, с помощью кривой намагничивания (см. рис. 7.8) определим относительный ток возбуждения $I_{\text{в.и}}^* = I_{\text{в.и}}/I_{\text{в.НОМ}} = 0,38$ А, т.е. $I_{\text{в.и}} = I_{\text{в.НОМ}}I_{\text{в.и}}^* = 0,8 \cdot 0,38 = 0,3$ А.

Задача 7.11. Для рассмотренного в задаче 7.3 ДПТНВ определить магнитный поток, ток возбуждения и сопротивление добавочного резистора в цепи обмотки возбуждения, при которых скорость идеального холостого хода на искусственной характеристике будет на 75% больше скорости холостого хода на естественной характеристике.

7.7. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ ЯКОРЯ

Данный способ широко используется для регулирования любых координат ЭП при высоких требованиях к показателям его качества. По этой причине до недавнего времени он являлся основным при создании регулируемых ЭП постоянного тока.

Реализация этого способа предусматривает питание якоря ДПТНВ от преобразователя, выходное напряжение которого регулируется по значению и может изменяться при необходимости по полярности. Если основным источником питания ЭП служит сеть переменного тока, то таким преобразователем является управляемый выпрямитель (УВ), а если используется источник напряжения постоянного тока, то это импульсный преобразователь с тем или иным способом модуляции.

Схема ЭП при питании якоря двигателя от УВ, получившая название система УВ—Д, показана на рис. 7.11, а. Здесь E_{π} — ЭДС УВ; R_{π} — внутреннее сопротивление УВ; $k_{\pi} = E_{\pi}/U_y$ — коэффициент усиления УВ, где U_y — входной сигнал управления. Напряжение на выходе УВ вследствие наличия внутреннего сопротивления R_{π} определяется по формуле

$$U = E_{\pi} - IR_{\pi}. \quad (7.29)$$

Обмотка возбуждения ДПТНВ питается от отдельного источника постоянного тока, например от неуправляемого или тоже управляемого выпрямителя.

Формулы для определения электромеханической и механической характеристик получим, подставляя (7.29) в (7.4) и (7.5):

$$\omega = E_{\pi}/(k\Phi) - I(R_{\pi} + R_{\pi})/(k\Phi) = \omega_0 - \Delta\omega; \quad (7.30)$$

$$\omega = E_{\pi}/(k\Phi) - M(R_{\pi} + R_{\pi})/(k\Phi)^2 = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (7.31)$$

Из (7.30) и (7.31) видно, что при изменении E_{π} пропорционально изменяется скорость идеального холостого хода ω_0 , а искусственные характеристики 2...8 (рис. 7.11, б), оставаясь линейными и параллельными друг другу, имеют по сравнению с естественной характеристикой 1 ДПТНВ больший наклон из-за наличия сопротивления R_{π} в выражении для определения перепада скорости $\Delta\omega$ (отметим, что естественная характеристика 1 соответствует питанию двигателя от источника с нулевым внутренним сопротивле-

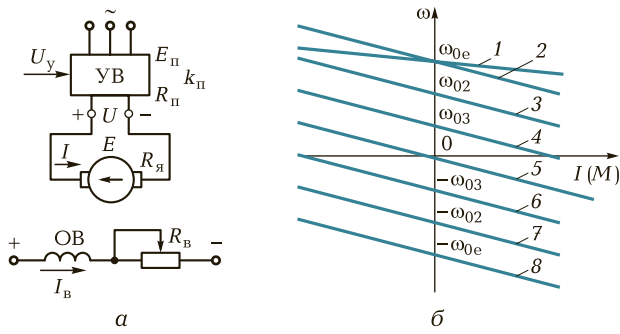


Рис. 7.11. Схема включения двигателя (а) и его характеристики (б) при регулировании напряжения на якоре:

1 — при питании двигателя от сети с номинальным напряжением; 2...8 — при питании от преобразователя при различных значениях его ЭДС

нием). Характеристики располагаются во всех четырех квадрантах параллельно друг другу; при $E_{п} = 0$ ДПТ работает в режиме динамического торможения.

Характеристики 2...8 соответствуют следующим соотношениям ЭДС УВ: $E_{п2} > E_{п3} > E_{п4}$; $E_{п5} = 0$; $E_{п6} = -E_{п4}$; $E_{п7} = -E_{п3}$; $E_{п8} = -E_{п2}$.

Управляемый выпрямитель чаще всего выполняется в виде электромашинной системы «генератор—двигатель» (Г—Д) или системы «тиристорный преобразователь—двигатель» (ТП—Д).

Система «генератор—двигатель». В этой системе, схема которой показана на рис. 7.12, якорь двигателя 4 непосредственно при-

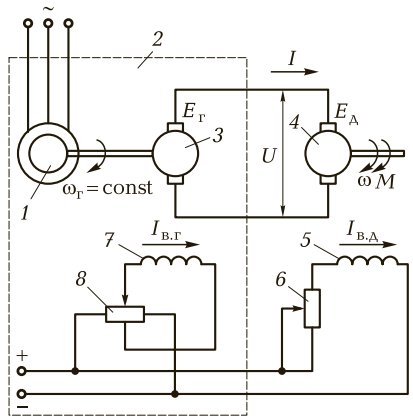


Рис. 7.12. Схема системы «генератор—двигатель»:

1 — двигатель генератора; 2 — агрегат постоянной скорости; 3 — генератор; 4 — двигатель; 5 — обмотка возбуждения двигателя; 6 — добавочный резистор; 7 — обмотка возбуждения генератора; 8 — потенциометр

соединяется к якору генератора 3, образующего вместе с приводным двигателем 1 электромашинный выпрямитель 2 трехфазного переменного тока в постоянный, вращающийся со скоростью ω_r . Регулирование напряжения на якоре двигателя происходит за счет изменения тока возбуждения генератора $I_{в.г}$ с помощью потенциометра 8, при этом изменяется ЭДС генератора E_r и соответственно напряжение на якоре двигателя U . Регулирование напряжения в этой системе может сочетаться с воздействием на магнитный поток двигателя, что обеспечит двухзонное регулирование скорости.

Регулирование магнитного потока двигателя осуществляется изменением $I_{в.д}$ за счет включения в цепь обмотки 5 возбуждения двигателя резистора 6. В замкнутых ЭП питание обмотки 7 возбуждения генератора происходит от регулируемого источника постоянного тока, например полупроводникового УВ. Характеристики системы Г—Д соответствуют показанным на рис. 7.11, б.

Основными достоинствами системы Г—Д являются большой диапазон и плавность регулирования скорости двигателя, высокая жесткость и линейность характеристик, возможность получения всех энергетических режимов работы, в том числе и рекуперативного торможения. В то же время для нее характерны такие недостатки, как утроенная установленная мощность системы, низкий КПД, инерционность процесса регулирования скорости, шум при работе.

Система «тиристорный преобразователь — двигатель». Основным типом преобразователей, применяемых в настоящее время в регулируемых ЭП постоянного тока, являются полупроводниковые статические преобразователи и, в первую очередь, тиристорные. Они представляют собой управляемые реверсивные или неревверсивные выпрямители, собранные по нулевой или мостовой однофазной или трехфазной схемам. Определенные перспективы связаны с использованием в них силовых транзисторов, которые в настоящее время применяются в основном для импульсного регулирования напряжения в ЭП небольшой мощности.

Принцип действия, свойства и характеристики системы ТП—Д рассмотрим на примере схемы, показанной на рис. 7.13, а, в которой использован однофазный двухполупериодный неревверсивный тиристорный выпрямитель, собранный по нулевой схеме.

Управляемый выпрямитель (преобразователь) включает в себя согласующий трансформатор T , имеющий две вторичные обмотки, два тиристора $VS1$ и $VS2$, сглаживающий реактор с индуктивностью L и систему импульсно-фазового управления СИФУ. Обмотка возбуждения двигателя ОВМ питается от своего источника.

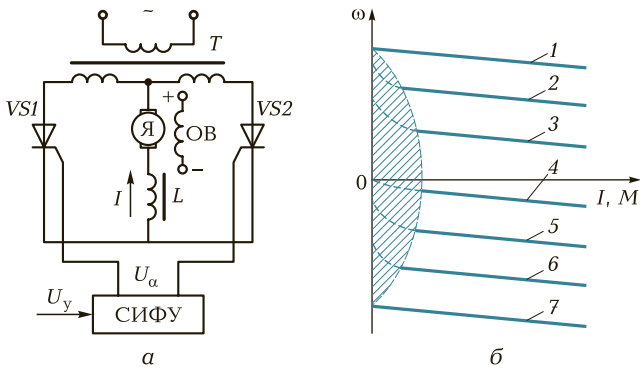


Рис. 7.13. Схема включения двигателя (а) и его характеристики (б) при регулировании напряжения на якоре с помощью тиристорного преобразователя:

1 — естественная характеристика двигателя; 2...7 — искусственные характеристики при различных углах регулирования тиристоров

Выпрямитель обеспечивает регулирование напряжения на двигателе за счет изменения среднего значения своей ЭДС $E_{\text{п}}$. Это достигается с помощью СИФУ, которая по сигналу U_y изменяет угол управления тиристорами α (угол задержки открытия тиристоров $VS1$ и $VS2$ относительно момента, когда потенциал на их анодах становится положительным по сравнению с потенциалом на катоде). Когда $\alpha = 0$, т.е. тиристоры $VS1$ и $VS2$ получают импульсы управления U_α от СИФУ в указанный момент, преобразователь осуществляет двухполупериодное выпрямление и на якорь двигателя подается полное напряжение. Если с помощью СИФУ подача импульсов управления на тиристоры $VS1$ и $VS2$ происходит со сдвигом (задержкой) на угол $\alpha \neq 0$, то ЭДС преобразователя снижается, а следовательно, уменьшается напряжение, подводимое к двигателю.

Зависимость среднего значения ЭДС многофазного преобразователя от угла управления тиристорами α имеет вид

$$E_{\text{ср}} = E_{\text{max}} m \sin(\pi/m) \cos(\alpha/\pi) = E_{\text{ср}0} \cos \alpha, \quad (7.32)$$

где m — число фаз; E_{max} — амплитудное значение ЭДС преобразователя; $E_{\text{ср}0}$ — ЭДС преобразователя при $\alpha = 0$.

Ввиду пульсирующего характера ЭДС преобразователя ток в цепи якоря также является пульсирующим, что оказывает вредное влияние на работу двигателя, приводя к ухудшению условий

работы его коллектора, дополнительным потерям энергии и нагреву. Для уменьшения вредного влияния пульсации тока в цепь якоря обычно включается сглаживающий реактор, индуктивность L которого выбирается в зависимости от допустимого уровня пульсации тока.

Уравнения для электромеханической и механической характеристик двигателя (рис. 7.13, б), питаемого от тиристорного преобразователя, получим, заменив в (7.30) и (7.31) $E_{\text{н}}$ на $E_{\text{ср}}$ из (7.32):

$$\omega = E_{\text{ср}0} \cos \alpha / (k\Phi) - I(R_{\text{я}} + R_{\text{н}}) / (k\Phi); \quad (7.33)$$

$$\omega = E_{\text{ср}0} \cos \alpha / (k\Phi) - M(R_{\text{я}} + R_{\text{н}}) / (k\Phi)^2, \quad (7.34)$$

где $R_{\text{н}} = x_{\text{т}}m / (2\pi) + R_{\text{т}} + R_{\text{L}}$ — эквивалентное сопротивление преобразователя; $x_{\text{т}}$, $R_{\text{т}}$ — соответственно приведенные ко вторичной обмотке индуктивное сопротивление рассеяния и активное сопротивление обмоток трансформатора; R_{L} — активное сопротивление сглаживающего реактора L .

Особенностью характеристик двигателя при его питании от УВ является наличие области (заштрихована на рисунке 7.13, б), где его характеристики нелинейны. В этой области двигатель работает в режиме прерывистого тока, что определяет заметное изменение (уменьшение) жесткости характеристик. Вследствие односторонней проводимости преобразователя характеристики располагаются только в первом (1...3 при $\alpha = 0, 30, 60^\circ$) и четвертом (4...7 при $\alpha = 90, 120, 150, 180^\circ$) квадрантах. Меньшим углам управления соответствует бóльшая $E_{\text{н}}$ и, следовательно, более высокая скорость двигателя; при $\alpha = \pi/2$ ЭДС УВ $E_{\text{н}} = 0$ и двигатель работает в режиме динамического торможения.

Для получения характеристик двигателя во всех четырех квадрантах используются реверсивные управляемые выпрямители, которые состоят из двух нереверсивных выпрямителей, например с нулевым выводом (рис. 7.14, а). Получить характеристики ДПТ в четырех квадрантах можно также и при использовании нереверсивного преобразователя за счет изменения направления тока возбуждения двигателя.

В реверсивных УВ используются два основных принципа управления комплектами вентиляей: совместное и раздельное.

Совместное управление предусматривает подачу от системы импульсно-фазового управления тиристорами импульсов управления U_{α} одновременно на тиристоры обоих комплектов — $VS1, VS3, VS5$ (катодная группа) и $VS2, VS4, VS6$ (анодная группа). При этом за счет наличия угла сдвига между импульсами управления

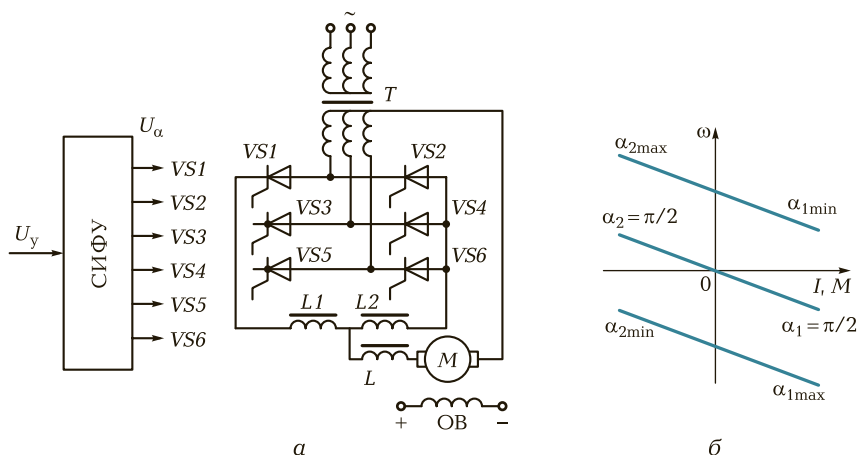


Рис. 7.14. Схема включения (а) и характеристики (б) двигателя при использовании реверсивного тиристорного преобразователя

двух комплектов тиристорov, близкого к π , один из них работает в выпрямительном режиме и проводит ток, а другой, работая в инверторном режиме, ток не проводит. Для обеспечения такого управления между средними значениями ЭДС выпрямителя и инвертора должно существовать соотношение $E_{\text{ср.и}} \geq E_{\text{ср.в}}$, однако за счет разности мгновенных значений ЭДС между комплектами тиристорov протекает так называемый уравнивательный ток. Для его ограничения в схеме, показанной на рис. 7.14, а, предусмотрены уравнивательные реакторы L_1 и L_2 .

Вид характеристик двигателя зависит от способа согласования углов управления двумя комплектами тиристорov. При линейном согласовании сумма углов выпрямителя α_1 и инвертора α_2 поддерживается равной π , характеристики двигателя линейны (рис. 7.14, б) и аналогичны характеристикам системы Г — Д.

Для уменьшения уравнивательных токов в ряде случаев используется нелинейное согласование, при котором сумма углов α_1 и α_2 несколько отличается от π . В этом случае имеет место заметное увеличение скорости двигателя при переходе от двигательного режима к генераторному. В силу этого обстоятельства нелинейное согласование применяется относительно редко.

Раздельное управление используется для полного исключения уравнивательных токов между комплектами тиристорov реверсивного УВ. Сущность его состоит в том, что импульсы управления подаются только на один из комплектов, который должен в дан-

ный момент проводить ток. На второй комплект импульсы не подаются, и он не работает (закрыт).

Управление преобразователем осуществляется в этом случае с помощью специального логического переключающего устройства (ЛПУ). Это устройство, осуществляя контроль за током преобразователя, обеспечивает включение в работу и выключение комплектов теристоров с небольшой паузой в 5... 10 мс. Вследствие этого вблизи оси скорости имеет место режим прерывистых токов, что отражается в нелинейности характеристик двигателя.

В заключение остановимся на основных свойствах системы ТП—Д. К достоинствам рассматриваемой системы относятся плавность и значительный диапазон регулирования скорости (более 10 в замкнутых ЭП); большая жесткость получаемых искусственных характеристик; высокий КПД электропривода, определяемый высокими КПД трансформаторов (0,93...0,98) и УВ (0,9...0,92); бесшумность в работе; простота в обслуживании и эксплуатации.

Наряду со значительными достоинствами системе ТП—Д присущи следующие недостатки: преобразователь имеет одностороннюю проводимость; для получения характеристик во всех четырех квадрантах необходимо использовать реверсивный двухкомплектный преобразователь; напряжение на якоре и ток имеют пульсирующий характер, что ухудшает условия работы двигателя; для сглаживания пульсации тока в большинстве случаев применяют сглаживающий реактор или более сложные многофазные схемы выпрямления; работа УВ характеризуется режимом прерывистого тока, при котором резко падает жесткость характеристик и они становятся нелинейными; с ростом диапазона регулирования скорости снижается коэффициент мощности ($\cos \varphi$) ЭП, определяемый для системы ТП—Д по приближенной формуле $\cos \varphi \approx \cos \alpha$; при работе электропривода вносятся искажения в форму тока и напряжения источника питания, что отрицательно сказывается на работе других приемников электроэнергии; тиристорные преобразователи обладают невысокой помехозащищенностью и малой перегрузочной способностью по току и напряжению.

Несмотря на отмеченные недостатки, система ТП—Д является высокоэффективным регулируемым ЭП постоянного тока и широко применяется для привода таких ответственных рабочих машин, как прокатные станы, металлорежущие станки, экскаваторы и др.

Задача 7.12. ДПТНВ типа 2ПФ250 имеет следующие паспортные данные: $U_{\text{ном}} = 220$ В; $P_{\text{ном}} = 45$ кВт; $n_{\text{ном}} = 1\,000$ мин⁻¹; $I_{\text{ном}} = 233$ А; $R_{\text{я}} = 0,07$ Ом.

Рассчитать и построить электромеханическую и механическую характеристики двигателя при питании его от ТП с внутренним сопротивлением $R_{\text{п}} = 0,1 \text{ Ом}$ при $E_{\text{п}} = U_{\text{ном}}$. Определить значение $E_{\text{п}}$, при котором механическая характеристика пройдет через точку с координатами $\omega_{\text{н}} = 30 \text{ рад/с}$, $M_{\text{н}} = 400 \text{ Н}\cdot\text{м}$, и построить эту характеристику. Определить для рассчитанной $E_{\text{п}}$ угол управления тиристорами α , приняв $E_{\text{ср}0} = 220 \text{ В}$.

7.8. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ В СИСТЕМЕ «ИСТОЧНИК ТОКА – ДВИГАТЕЛЬ»

В рассмотренных ранее схемах системы «преобразователь—двигатель» якорь питался от преобразователя со свойствами источника напряжения. Такой преобразователь имеет небольшое (в идеале нулевое) собственное внутреннее сопротивление, за счет чего падение напряжения в нем при протекании тока также невелико и подаваемое на двигатель напряжение изменяется мало. В пределе при нулевом внутреннем сопротивлении преобразователя напряжение на его выходе постоянно и не зависит от тока нагрузки. Вольт-амперная характеристика идеального преобразователя со свойствами источника напряжения показана на рис. 7.15 горизонтальной линией 1.

В последние годы широкое распространение в электроприводе находят и преобразователи со свойствами источника тока. Они характеризуются тем, что выдают в нагрузку мало изменяющийся (в идеале постоянный) ток (прямая 2 на рис. 7.15). Двигатель, питаемый от такого преобразователя, приобретает специфические характеристики и возможности по регулированию координат и, в первую очередь, момента.

Схема системы, получившей название «источник тока—двигатель» (ИТ—Д), показана на рис. 7.16, а. В этой схеме якорь двигателя 2 подключен к источнику тока 1 и обтекается постоянным током. Значение тока в обмотке возбуждения 3 и его направление

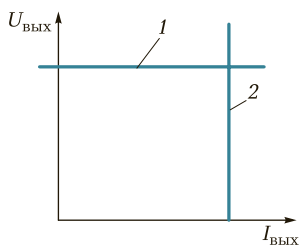


Рис. 7.15. Характеристики источника напряжения (1) и тока (2)

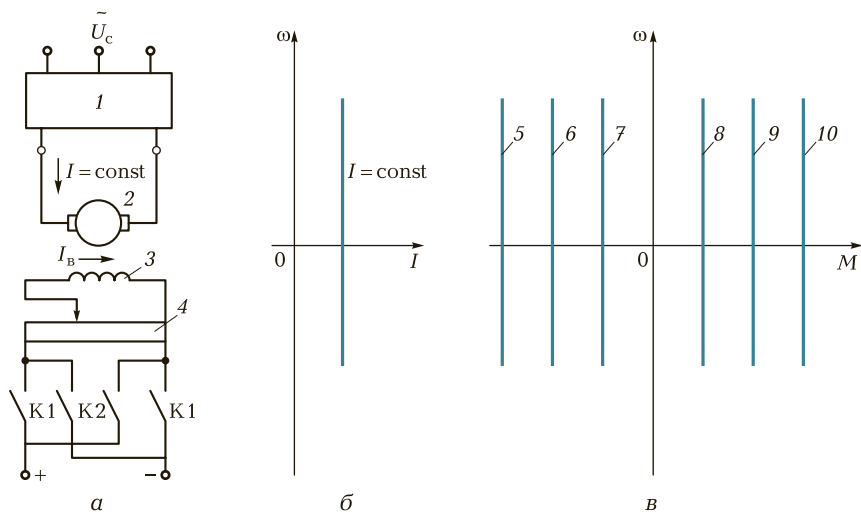


Рис. 7.16. Схема включения двигателя (а) и его характеристики электро-механическая (б) и механические (в) при использовании источника тока: 1 — источник тока; 2 — двигатель; 3 — обмотка возбуждения; 4 — потенциометр; 5... 10 — механические характеристики при различных токах возбуждения

могут изменяться с помощью потенциометра 4 и контактов К1 и К2. Так как $I = \text{const}$, электро-механическая характеристика двигателя будет представлять собой вертикальную прямую линию (рис. 7.16, б).

Семейство механических характеристик легко получить на основании формулы (7.3). Из нее видно, что при $I = \text{const}$ момент двигателя и его направление определяются соответственно значением магнитного потока и его знаком. Таким образом, если с помощью потенциометра 4 (рис. 7.16, а) и контактов К1 и К2 изменять значение тока возбуждения и его направление, а тем самым и магнитный поток Φ , можно получить механические характеристики в виде прямых 1...6 при различных магнитных потоках от $-\Phi_1$ до $+\Phi_6$ (рис. 4.16, в). Такие характеристики обеспечивают постоянство момента на валу двигателя при любой его скорости, а ЭП приобретает свойства источника момента, управляемого по цепи возбуждения.

В каких же случаях могут потребоваться механические характеристики такого вида? Вспомним, что одна из функций ЭП связана с обеспечением регулируемого по значению усилия или момента для создания на исполнительном органе рабочей машины тре-

буемого натяжения в обрабатываемом или изготавливаемом материале или изделии (производство листового металла, проводов, бумаги, текстильного полотна и др.). Очевидно, что ЭП с такими механическими характеристиками наиболее просто обеспечит выполнение этой функции, а также позволит получить постоянные по значению ускорения или замедления движения.

В системе ИТ—Д для регулирования скорости может быть сформирован и горизонтальный участок механических характеристик. Это достигается введением обратных связей (в частности, нелинейной отрицательной обратной связи по скорости двигателя).

7.9. ИМПУЛЬСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В последние годы в связи с развитием полупроводниковой техники получил распространение импульсный способ регулирования скорости ЭП, применение которого позволяет в ряде случаев упростить его силовую схему и повысить надежность ее работы. Этот способ является к тому же практически единственным при питании двигателя от нерегулируемого источника постоянного тока (аккумуляторной батареи, неуправляемого выпрямителя и др.).

Регулирование скорости в этом случае осуществляется импульсным изменением напряжения, магнитного потока или сопротивления резистора в якорной цепи, т. е. рассмотренными ранее основными способами получения искусственных характеристик двигателя.

Импульсное регулирование осуществляется с помощью управляемых полупроводниковых ключей любого типа. Основным показателем работы ключа является заполнение (скважность его работы), определяемое отношением времени его замкнутого состояния к периоду коммутации T_k :

$$\gamma = t_3/T_k = t_3/(t_3 + t_0), \quad (7.35)$$

где t_0 — продолжительность разомкнутого состояния ключа; t_3 — продолжительность замкнутого состояния ключа.

На практике применяются два основных способа управления ключом — широтно-импульсная и частотно-импульсная модуляции. При широтно-импульсной модуляции период коммутации ключа T_k остается постоянным, а изменяется время его замкнуто-

го состояния t_3 , т. е. изменяется ширина импульсов при неизменном периоде (частоте) их следования.

При частотно-импульсной модуляции время t_3 остается неизменным, а меняется период коммутации ключа $T_{к\tau}$, который обратно пропорционален частоте коммутации. Заметим, что при обоих способах управления ключом меняется заполнение γ , т. е. заполнение оказывается универсальным показателем и им удобно пользоваться при анализе импульсных способов регулирования координат.

Импульсное регулирование сопротивления добавочного резистора в цепи якоря, схема реализации которого и соответствующие характеристики показаны на рис. 7.17, осуществляется путем периодической коммутации (замыкания и размыкания) по определенному закону ключа 1 , включенного параллельно резистору 2 с сопротивлением R_{Δ} .

Семейство механических характеристик ДПТНВ при импульсном регулировании получим, проанализировав граничные режимы работы ключа 1 : его постоянно разомкнутое и постоянно замкнутое состояния. При $\gamma = 1$ резистор 2 выведен из цепи якоря 3 и двигатель, следовательно, работает на естественной механической характеристике 4 . Если $\gamma = 0$, резистор 2 введен в цепь якоря и двигатель работает по искусственной характеристике 6 . При $0 < \gamma < 1$ механические характеристики 5 располагаются между двумя граничными характеристиками.

Математическое выражение для семейства характеристик, показанных на рис. 7.17, приведем без вывода:

$$\omega = U / (k\Phi) - M(R_{\Delta} (1 - \gamma) + R_{я}) / (k\Phi)^2.$$

При импульсном регулировании магнитного потока двигателя, схема которого и соответствующие характеристики показаны на

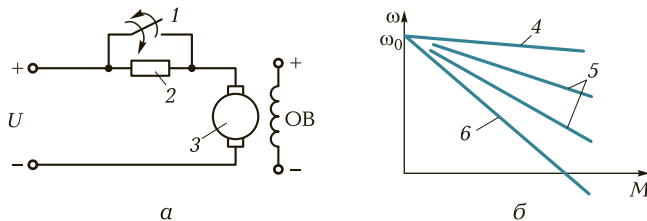


Рис. 7.17. Схема включения двигателя (а) и его характеристики (б) при импульсном регулировании сопротивления добавочного резистора:

1 — импульсный ключ; 2 — резистор; 3 — двигатель; $4...6$ — характеристики двигателя

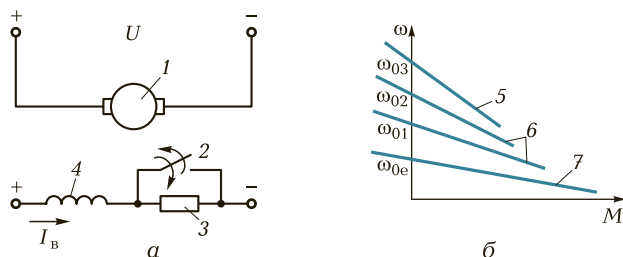


Рис. 7.18. Схема включения двигателя (а) и его характеристики (б) при импульсном регулировании магнитного потока:

1 — двигатель; 2 — импульсный ключ; 3 — резистор; 4 — обмотка возбуждения; 5...7 — характеристики двигателя

рис. 7.18, в цепь обмотки возбуждения 4 включен добавочный резистор 3, шунтированный ключом 2. Заполнение γ ключа может регулироваться в пределах от 0 до 1. Проанализировав и в этом случае предельные режимы работы ключа 2, получим семейство искусственных характеристик. При $\gamma = 1$ ключ постоянно замкнут, резистор 3 шунтирован, по обмотке возбуждения 4 протекает номинальный ток и двигатель 1 работает по естественной характеристике 7. При $\gamma = 0$ ключ 2 постоянно разомкнут, резистор 3 введен в цепь обмотки возбуждения 4, ток возбуждения и магнитный поток уменьшаются и двигатель работает по искусственной характеристике 5. При значениях $0 < \gamma < 1$ двигатель работает на промежуточных характеристиках 6.

При импульсном регулировании напряжения на якоре двигателя, схема которого и соответствующие характеристики показаны на рис. 7.19, ключом 1 якорь 2 периодически подключается к источнику с напряжением U_c . При замкнутом ключе 1 ток в яко-

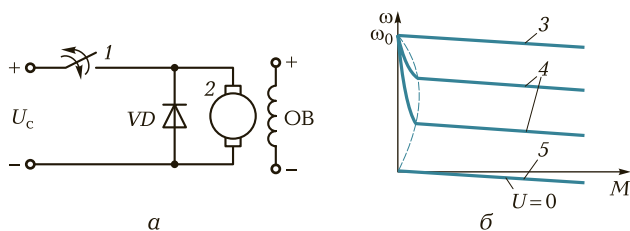


Рис. 7.19. Схема включения двигателя (а) и его характеристики (б) при импульсном регулировании напряжения на якоре двигателя:

1 — импульсный ключ; 2 — двигатель; 3...5 — характеристики двигателя

ре протекает под действием напряжения U_c источника, а при разомкнутом — под действием наводимой в якоре ЭДС самоиндукции, замыкаясь через диод VD . Ток в якоре имеет при этом пульсирующий характер. Регулируя заполнение ключа, можно получать различные механические характеристики двигателя.

При $\gamma = 1$ на якорь постоянно подается полное напряжение источника и двигатель работает по естественной характеристике 3. Если $\gamma = 0$, то напряжение не поступает на якорь, двигатель оказывается включенным по схеме динамического торможения и его механическая характеристика 5 проходит через начало координат. Промежуточным значениям заполнения $0 < \gamma < 1$ соответствует работа двигателя на механических характеристиках 4, располагающихся между двумя граничными характеристиками.

При импульсном регулировании напряжения возможен режим прерывистого тока, в области расположения которого (слева от штриховой линии) характеристики двигателя криволинейны. Математическое выражение для прямолинейных участков характеристик двигателя имеет вид

$$\omega = \gamma U_c / (k\Phi) - MR_{\Sigma} / (k\Phi)^2.$$

В схемах импульсного регулирования современных ЭП применяются бесконтактные полупроводниковые ключи, обычно тиристорные.

Показатели импульсного регулирования скорости в основном такие же, как при непрерывном регулировании. Вместе с тем энергетические показатели импульсных электроприводов постоянного тока несколько хуже. Это объясняется наличием в кривой тока якоря переменной составляющей, что приводит к дополнительным потерям энергии в двигателе.

7.10. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В ЭП электрического транспорта и ряда грузоподъемных машин и механизмов нашли широкое применение двигатели постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТПВ), схема включения и кривая намагничивания которых показаны на рис. 7.20. Основной особенностью этих двигателей является включение обмотки возбуждения 2 последовательно с обмоткой якоря 1

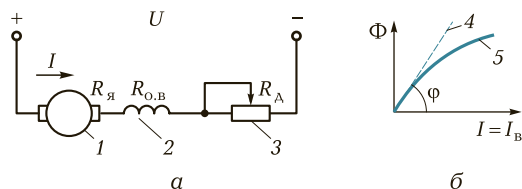


Рис. 7.20. Схема включения (а) и характеристики намагничивания (б) двигателя постоянного тока последовательного возбуждения:

1 — якорь; 2 — обмотка возбуждения; 3 — резистор; 4 и 5 — характеристики двигателя

и добавочным резистором 3, вследствие чего ток якоря одновременно является и током возбуждения.

Согласно (7.1)...(7.3) электромеханическая и механическая характеристики двигателя выражаются формулами:

$$\omega = (U - IR) / [k\Phi(I)]; \quad (7.36)$$

$$\omega = U / [k\Phi(I) - MR / (k\Phi(I))^2], \quad (7.37)$$

в которых дополнительно показана зависимость магнитного потока от тока якоря (возбуждения) $\Phi(I)$, а $R = R_я + R_{о.в.} + R_Δ$.

Магнитный поток и ток связаны между собой кривой намагничивания 5, описав которую с помощью приближенного аналитического выражения можно получить формулы для характеристик двигателя.

В простейшем случае кривую намагничивания представляют прямой линией 4. Такая аппроксимация по существу означает пренебрежение насыщением магнитной системы двигателя и позволяет представить зависимость потока от тока следующим образом:

$$\Phi = aI, \quad (7.38)$$

где $a = \operatorname{tg} \varphi$.

При линейной аппроксимации момент, как это следует из (7.3), является квадратичной функцией тока:

$$M = k\Phi I = kaI^2. \quad (7.39)$$

Подставив (7.38) в (7.36), получим следующее выражение для электромеханической характеристики двигателя:

$$\omega = U / (kaI) - R / (ka). \quad (7.40)$$

Выразив в (7.40) ток через момент с помощью (7.39), получим следующее выражение для механической характеристики:

$$\omega = U / \sqrt{kaM} - R / (ka). \quad (7.41)$$

Для построения характеристик $\omega(I)$ и $\omega(M)$ проведем краткий анализ формул (7.40) и (7.41). Найдем асимптоты этих характеристик при токе и моменте, стремящихся к предельным значениям — нулю и бесконечности.

При $I \rightarrow 0$ и $M \rightarrow 0$ скорость, как это следует из (7.40) и (7.41), принимает бесконечно большое значение, т. е. $\omega \rightarrow \infty$. Это означает, что ось скорости является первой искомой асимптотой характеристик $\omega(I)$ и $\omega(M)$. При $I \rightarrow \infty$ и $M \rightarrow \infty$ скорость $\omega \rightarrow -R/(ka)$, т. е. прямая с ординатой $\omega_a = -R/(ka)$ является второй, горизонтальной асимптотой этих характеристик.

Зависимости $\omega(I)$ и $\omega(M)$ имеют при этом гиперболический характер, что позволяет с учетом сделанного анализа представить их в виде кривых, показанных на рис. 7.21.

Особенность полученных характеристик состоит в том, что при небольших токах и моментах двигателя, соответствующих малым моментам нагрузки, его скорость принимает большие значения, при этом характеристики не пересекают ось скорости. Таким образом, для двигателя последовательного возбуждения, включенного по основной схеме (см. рис. 7.20), не существуют режимы холостого хода и генератора, работающего параллельно с сетью (или режима рекуперативного торможения), так как характеристики во втором квадранте не проходят.

Это объясняется тем, что при $I, M \rightarrow 0$ магнитный поток $\Phi \rightarrow 0$, а следовательно, в соответствии с (7.1) $E \rightarrow U$. Другими словами, при любой скорости $E < U$, в силу чего отдачи энергии в сеть происходить не может. Отметим, что из-за наличия в двигателе потока остаточного намагничивания $\Phi_{ост}$ практически скорость холостого хода существует и равна в этом случае отношению $U/(k\Phi_{ост})$.

Остальные режимы работы ДПТПВ аналогичны режимам работы ДПТНВ: двигательный режим имеет место при $0 < \omega < \infty$,

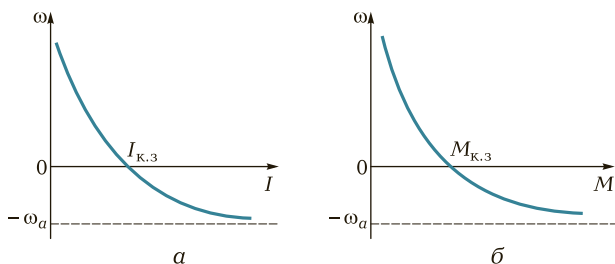


Рис. 7.21. Электромеханическая (а) и механическая (б) характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

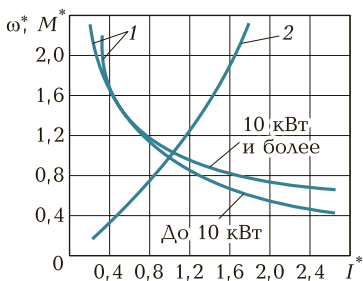


Рис. 7.22. Универсальные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения:
1 — зависимости скорости от тока; 2 — зависимости момента от тока

режим короткого замыкания при $\omega = 0$, а режим генератора, включенного последовательно с сетью (торможение противовключением), при $\omega < 0$. Кроме того, ДПТПВ может работать в генераторном режиме независимо от сети постоянного тока (динамическое торможение), подробно рассмотренном далее.

Выражения (7.40) и (7.41) являются приближенными и не могут быть использованы для точных инженерных расчетов. Причина этого заключается в принятой линейной аппроксимации кривой намагничивания, в то время как реально двигатели работают в области насыщенной магнитной системы. Поэтому для точных практических расчетов используются так называемые универсальные характеристики ДПТПВ, показанные на рис. 7.22. Они представляют собой зависимости относительных скорости $\omega^* = \omega/\omega_{\text{ном}}$ (кривые 1) и момента $M^* = M/M_{\text{ном}}$ (кривая 2) от относительного тока $I^* = I/I_{\text{ном}}$. Для получения характеристик с большей точностью зависимость $\omega^*(I^*)$ представляется двумя кривыми — для двигателей до 10 кВт и двигателей на 10 кВт и более. Рассмотрим использование этих характеристик на конкретном примере.

Задача 7.13*. Рассчитать и построить естественные характеристики ДПТПВ типа Д31, имеющего следующие данные: $P_{\text{ном}} = 8 \text{ кВт}$; $n_{\text{ном}} = 800 \text{ мин}^{-1}$; $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$; $I_{\text{ном}} = 46,5 \text{ А}$; $\eta_{\text{ном}} = 0,78$.

Определим номинальные скорость и момент:

$$\omega_{\text{ном}} = 2\pi n_{\text{ном}}/60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 800/60 = 83,7 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/\omega_{\text{ном}} = 8000/83,7 = 95,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Задаваясь относительными значениями тока I^* , по универсальным характеристикам ДПТПВ (рис. 7.22) найдем относительные значения момента M^* и скорости ω^* . Затем, умножая относительные значения переменных на их номинальные значения, получим точки для построения искомым характеристик двигателя:

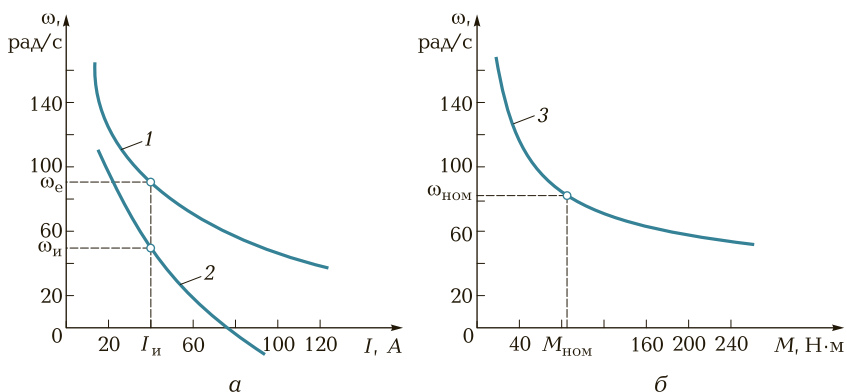


Рис. 7.23. Характеристики (а и б) к задаче 7.13

I^*	0,4	0,8	1,2	1,6	2
M^*	0,3	0,7	1,3	1,9	2,6
ω^*	1,8	1,1	0,9	0,8	0,6
$\omega = \omega^* \omega_{НОМ}$, рад/с	151	92	75	63	50
$M = M^* M_{НОМ}$, Н·м	28,7	66,9	124	181	248
$I = I^* I_{НОМ}$, А	18,6	37,2	55,8	74,7	93

По полученным данным построим естественные электромеханическую (кривая 1) и механическую (кривая 3) характеристики двигателя (рис. 7.23), а также искусственную характеристику 2.

Регулирование координат двигателя в соответствии с выражениями (7.40) и (7.41) может осуществляться с помощью добавочных резисторов в цепи якоря, изменением магнитного потока двигателя и подводимого к нему напряжения.

7.11. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Регулирование тока, момента и скорости двигателя **с помощью резисторов** отличается в первую очередь простотой своей реализации (см. рис. 7.20).

Искусственные электромеханические и механические характеристики 2 при введении в якорь добавочного резистора располагаются ниже естественной 1, причем чем больше R_{Δ} , тем больше снижается скорость (рис. 7.24, а и б).

Регулирование скорости двигателя данным способом характеризуется следующими показателями: диапазон 2...3; направление регулирования скорости — вниз; плавность регулирования, определяемая плавностью изменения R_{Δ} ; стабильность скорости, снижающаяся по мере увеличения R_{Δ} ; допустимая нагрузка — постоянный момент, равный номинальному; экономическая целесообразность имеет место при небольших диапазонах регулирования скорости или кратковременной работе на пониженных скоростях.

Регулирование тока и момента с помощью резисторов характеризуется невысокой точностью при простой схемной реализации.

Рассмотрим способы расчета регулировочных резисторов, включение которых в цепь якоря двигателя позволяет получить требуемую искусственную (одну или несколько) электромеханическую или механическую характеристику. Задача в этом случае формулируется так: при известных паспортных данных двигателя и его естественной характеристике определить значение сопротивления резистора R_{Δ} , которое обеспечит прохождение электромеханической или механической характеристики через точку с координатами $(\omega_{и}, I_{и})$ или $(\omega_{и}, M_{и})$.

Наиболее простой путь решения этой задачи предусматривает использование формулы

$$R_{\Delta} = (1 - \omega_{и}/\omega_e)(U_{ном}/I_{ном} - R_{\Delta} - R_{о.в}). \quad (7.42)$$

Теперь при заданных координатах $(\omega_{и}, I_{и})$ рассчитать R_{Δ} просто: по естественной характеристике для заданного тока $I_{и}$ определяют скорость ω_e и все имеющиеся данные подставляют в (7.42).

Отметим, что необходимые для расчета значения R_{Δ} и $R_{о.в}$ могут быть найдены по справочникам, экспериментально или приближенно по формуле

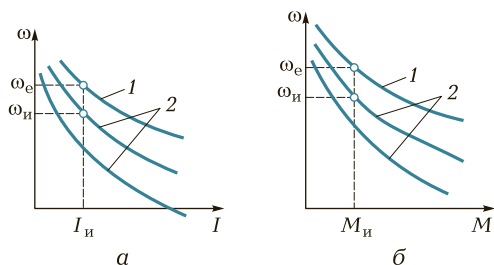


Рис. 7.24. Электромеханические (а) и механические (б) характеристики двигателя при различных сопротивлениях добавочного резистора в цепи якоря:

1 — естественные; 2 — реостатные

$$R_A + R_{о.в} \approx 0,75U_{ном}(1 - \eta_{ном})/I_{ном}. \quad (7.43)$$

Если задана точка механической характеристики с координатами $(\omega_{и}, M_{и})$, то сначала по заданному моменту $M_{и}$ с помощью универсальной характеристики $M^*(I^*)$ определяется ток $I_{и}$, а затем повторяется расчет, рассмотренный ранее.

Регулирование скорости изменением магнитного потока производится по схеме рис. 7.25, а, в которой для этого изменяется сопротивление резистора 2, включенного параллельно обмотке возбуждения 3 двигателя. Отметим, что регулирование магнитного потока для этого типа двигателей постоянного тока не является полностью независимым, так как ток возбуждения при этом по-прежнему пропорционален току якоря I , определяемому нагрузкой ЭП.

Для определения вида и расположения искусственных механических характеристик двигателя, получаемых при различных сопротивлениях $R_{ш}$ шунтирующего резистора 2, проведем следующий анализ.

При $R_{ш} = \infty$ (разрыв шунтирующей цепи) двигатель оказывается включенным по своей основной схеме, чему соответствует естественная характеристика 4 (рис. 7.25, б).

При $0 < R_{ш} < \infty$ часть тока якоря поступает в шунтирующую цепь ($I_{ш} \neq 0$), поэтому ток возбуждения $I_{в}$ и магнитный поток Φ уменьшаются, что в соответствии с (7.36) и (7.37) вызывает увеличение скорости двигателя, при этом искусственные механические характеристики 5 располагаются выше естественной.

При $M \rightarrow 0, I \rightarrow 0, I_{в} \rightarrow 0, \Phi \rightarrow 0$ скорость $\omega \rightarrow \infty$, т. е. и в этом случае ось скорости является асимптотой для всех искусственных механических характеристик.

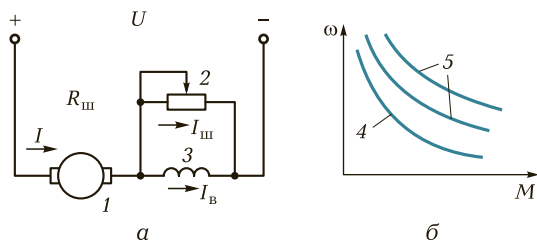


Рис. 7.25. Схема включения (а) и характеристики (б) двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при изменении магнитного потока:

1 — якорь двигателя; 2 — добавочный резистор; 3 — обмотка возбуждения двигателя; 4 — естественная характеристика; 5 — искусственные характеристики

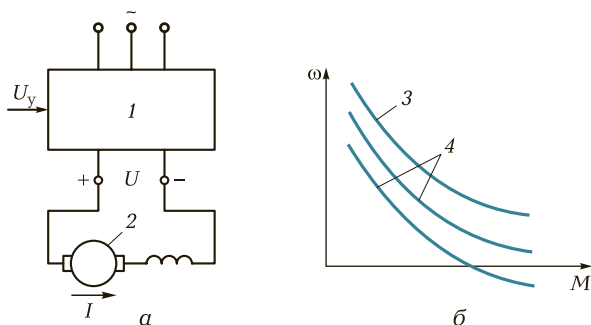


Рис. 7.26. Схема включения (а) и характеристики (б) двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при изменении напряжения: 1 — преобразователь; 2 — двигатель; 3 — естественная характеристика; 4 — искусственные характеристики

Показатели регулирования скорости ДППВ этим способом совпадают с показателями ДПТНВ.

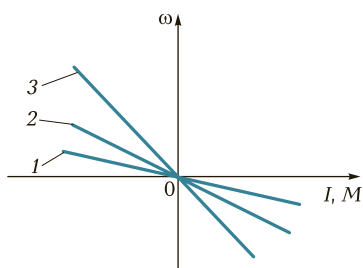
При регулировании скорости изменением напряжения, схема реализации и характеристики которого показаны на рис. 7.26, двигатель 2 подключается к управляемому выпрямителю 1. Выходное напряжение этого выпрямителя U регулируется в соответствии с изменением входного управляющего сигнала U_y . При $U = U_{ном}$ и без учета внутреннего сопротивления управляемого выпрямителя двигатель работает по естественной характеристике 3. При снижении напряжения в соответствии с (7.36) и (7.37) его скорость снижается и искусственные характеристики 4 будут располагаться ниже естественной. При $I \rightarrow 0$, $M \rightarrow 0$, $\Phi \rightarrow 0$ скорость $\omega \rightarrow \infty$, т. е. ее ось является асимптотой характеристик двигателя.

Показатели регулирования скорости изменением напряжения ДППВ соответствуют показателям двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

7.12. ТОРМОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Для осуществления принудительного электрического торможения двигатель необходимо перевести в генераторный режим работы.

Рис. 7.27. Графики характеристик (1...3) двигателя при динамическом торможении



Динамическое торможение ДПТПВ может быть реализовано по двум схемам — с независимым возбуждением и с самовозбуждением.

Динамическое торможение ДПТПВ с независимым возбуждением реализуется по схеме, показанной на рис. 7.2, и по своей сути аналогично динамическому торможению ДПТНВ. Характеристики двигателя в этом случае описываются уравнениями (7.9) и (7.10) и имеют вид прямых 1...3, проходящих через начало координат (рис. 7.27). Из этих уравнений также видно, что с увеличением сопротивления резистора R_A наклон характеристик к горизонтальной оси увеличивается.

Динамическое торможение ДПТПВ с самовозбуждением реализуется по схеме, показанной на рис. 7.28, а, при последовательном соединении обмоток якоря 1, возбуждения 2 и резистора 3 (резистор может отсутствовать).

Для возникновения и существования режима самовозбуждения необходимо выполнение следующих условий: наличие остаточного магнитного потока $\Phi_{ост}$ в двигателе; совпадение по направле-

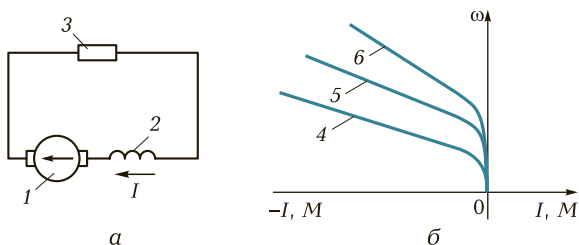


Рис. 7.28. Схема включения (а) и характеристики (б) двигателя при торможении с самовозбуждением:

1 — якорь двигателя; 2 — обмотка возбуждения; 3 — резистор; 4...6 — характеристики при различном сопротивлении добавочного резистора

нию $\Phi_{ост}$ и основного магнитного потока Φ , создаваемого током возбуждения; сопротивление цепи обмотки якоря (с учетом сопротивления R_A резистора 3) меньше критического.

Динамическое торможение ДППВ с самовозбуждением происходит следующим образом. При наличии остаточного магнитного поля и вращении якоря в якоре наводится ЭДС, под действием которой по якору и обмотке возбуждения двигателя начинает протекать ток. Этот ток создает основной магнитный поток Φ , который, совпадая по направлению с остаточным потоком $\Phi_{ост}$, приводит к увеличению ЭДС, а значит, и влечет за собой увеличение тока в двигателе. Такой процесс самовозбуждения будет продолжаться до тех пор, пока ЭДС не станет равной суммарному падению напряжения в цепи якоря.

Универсальные характеристики 4...6 ДППВ в режиме торможения, соответствующие различным сопротивлениям резистора 3 $R_{A1} < R_{A2} < R_{A3}$, показаны на рис. 7.28, б.

Торможение противовключением ДППВ, схема которого показана на рис. 7.29, а, осуществляется изменением полярности напряжения на обмотке якоря при сохранении того же направления тока в обмотке возбуждения, или наоборот. При этом изменяется знак момента двигателя. Для ограничения тока в этом режиме торможения в цепь якоря 1 вводится дополнительный резистор 2.

Процесс торможения иллюстрируют характеристики, показанные на рис. 7.29, б. До торможения двигатель работал в точке а характеристики 3, преодолевая момент сопротивления M_c . После изменения полярности напряжения на обмотке якоря и ввода в его

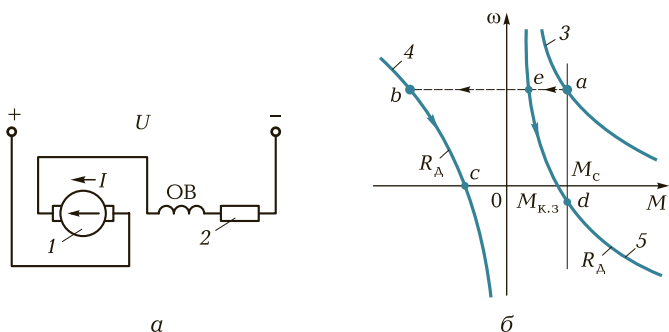


Рис. 7.29. Схема включения (а) и характеристики (б) двигателя при торможении противовключением:

1 — цепь якоря; 2 — дополнительный резистор; 3 — естественная характеристика; 4 и 5 — характеристики при торможении

цепь добавочного резистора с сопротивлением R_{Δ} двигатель переходит на работу по характеристике 4 (точка b). Начинается процесс торможения противовключением, которому соответствует участок bc . В точке c торможение заканчивается (скорость двигателя равна нулю), и схема управления отключает двигатель от сети.

Торможение противовключением также реализуется и в том случае, когда двигатель нагружен активным моментом M_c , превышающим момент короткого замыкания $M_{к.з}$. Рассмотрим этот вариант торможения с помощью рис. 7.29, б.

Допустим, что двигатель в исходном режиме работает в точке a на характеристике 1, преодолевая активный момент нагрузки M_c . Если теперь, не изменяя полярность напряжения на обмотке якоря, ввести в якорную цепь дополнительный резистор R_{Δ} , то двигатель будет работать по характеристике 5 (точка e). Так как момент двигателя при этом станет меньше момента нагрузки, то он начнет сначала тормозиться, а затем под действием активного момента нагрузки $M_c > M_{к.з}$ разгоняться в противоположном направлении до тех пор, пока в точке d моменты нагрузки и двигателя не сравняются. Двигатель при этом будет работать в режиме торможения противовключением. Такой способ торможения часто используется в ЭП грузоподъемных машин и механизмов, создающих на валу двигателя активный момент нагрузки.

Задача 7.14. Для двигателя Д31 (данные см. в задаче 7.13) рассчитать сопротивление добавочного резистора R_{Δ} , при включении которого электромеханическая характеристика пройдет через точку с координатами $\omega_n = 50$ рад/с, $I_n = 40$ А, и построить эту характеристику.

Определим суммарное сопротивление обмоток якоря и возбуждения двигателя по (7.43):

$$R_{\Delta} + R_{о.в} \approx 0,75 U_{ном} (1 - \eta_{ном}) / I_{ном} = 0,75 \cdot 220 (1 - 0,78) / 46,5 = 0,78 \text{ Ом.}$$

По естественной характеристике 1 (см. рис. 7.23) для тока $I_n = 40$ А найдем $\omega_e = 90$ рад/с.

Подставив все имеющиеся данные в (7.42), получим

$$R_{\Delta} = (1 - \omega_n / \omega_e) (U_{ном} - R_{я} - R_{о.в}) = (1 - 50/90) (220/40 - 0,78) = 2,1 \text{ Ом.}$$

Для ряда значений тока по естественной характеристике 1 (см. рис. 7.23) определим значения скорости ω_e . Далее вычислим скорости ω_n на искусственной характеристике при тех же токах. Используем полученные данные для построения искусственной электромеханической характеристики 2:

$I, \text{ А}$	20	40	60	80	100
$\omega_e, \text{ рад/с}$	130	90	74	60	48
$\omega_n, \text{ рад/с}$	103	50	20	-4	-23

Задача 7.15. Для двигателя Д31 (см. задачу 7.13) рассчитать R_A , включение которого в цепь якоря позволит снизить скорость двигателя в три раза при номинальном моменте нагрузки.

Задача 7.16. Для двигателя Д31 (см. задачу 7.13) найти сопротивление резистора R_A , включение которого позволит снизить ток двигателя в первый момент пуска до уровня $2I_{\text{ном}}$.

Задача 7.17. Для двигателя Д31 (см. задачу 7.13) определить сопротивление резистора R_A , при включении которого механическая характеристика двигателя пройдет через точку с координатами $\omega_{\text{н}} = 0,2\omega_{\text{ном}}$, $M_{\text{н}} = 0,9M_{\text{ном}}$.

7.13. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

ДПТСВ, схема включения которого показана на рис. 7.30, *а*, имеет две обмотки возбуждения — независимую 1, подключаемую к источнику питания через резистор 2, и последовательную 4, включаемую последовательно с резистором 3 и обмоткой якоря 5. Вследствие этого магнитный поток двигателя представляет собой сумму двух составляющих — потока $\Phi_{\text{о.в.н}}$, создаваемого обмоткой 1, и потока $\Phi_{\text{о.в.п}}$, создаваемого обмоткой 4. Зависимость этих потоков и суммарного потока Φ от тока якоря показана на

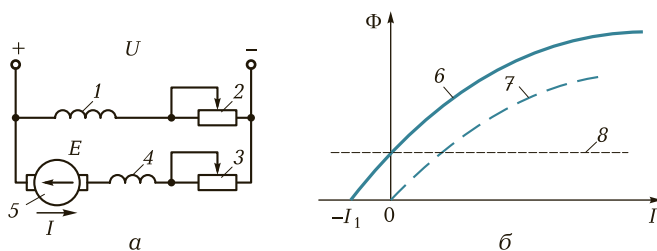


Рис. 7.30. Схема включения (*а*) и характеристики (*б*) двигателя постоянного тока смешанного возбуждения:

1 — независимая обмотка возбуждения; 2 и 3 — добавочные резисторы; 4 — последовательная обмотка возбуждения; 5 — якорь двигателя; 6 — результирующий график магнитного потока; 7 — график магнитного потока, создаваемого последовательной обмоткой возбуждения; 8 — график магнитного потока, создаваемого независимой обмоткой возбуждения

рис. 7.30, б соответственно в виде штриховых линий 8 и 7 и сплошной линии 6. Важно отметить, что при токе якоря, стремящемся к значению $-I_1$, магнитный поток Φ стремится к нулю, т. е. двигатель размагничивается.

Электромеханическая и механическая характеристики ДПТСВ выражаются соответственно формулами (7.36) и (7.37), в которых магнитный поток Φ также есть функция тока якоря.

Для практических расчетов используются универсальные характеристики ДПТСВ, которые приводятся в справочной литературе и показаны на рис. 7.31. Они представляют собой зависимости 1 и 2 соответственно относительных скорости $\omega^* = \omega/\omega_{\text{ном}}$ и момента $M^* = M/M_{\text{ном}}$ от относительного тока якоря $I^* = I/I_{\text{ном}}$, которые во многом схожи с универсальными характеристиками ДППВ, но имеют одно существенное отличие: определенную скорость идеального холостого хода.

Поскольку характеристики ДПТСВ располагаются и во втором квадранте, это означает, что он может работать во всех возможных энергетических режимах.

Регулирование координат ЭП с этим типом ДПТСВ может осуществляться изменением напряжения, магнитного потока и сопротивления добавочного резистора в цепи якоря. ДПТСВ обеспечивает также следующие режимы торможения ЭП: динамическое с независимым возбуждением и самовозбуждением, противозвключением и рекуперативное.

Отметим, что наличие двух обмоток возбуждения существенно увеличивает расход материалов на изготовление двигателя и тем

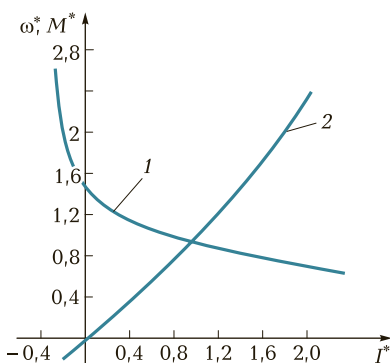


Рис. 7.31. Универсальные характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения:

1 — зависимость скорости от тока; 2 — зависимость момента от тока

самым его массу, габаритные размеры и стоимость. По этой причине этот тип двигателя в настоящее время применяется только в тех случаях, когда его использование диктуется какими-либо специфическими требованиями и подтверждается технико-экономическими расчетами.

7.14. РАЗОМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

К разомкнутым относятся схемы, в которых для управления ЭП не используются обратные связи по его координатам или технологическим параметрам приводимых в движение рабочей машины или производственного механизма. Эти схемы, отличаясь простотой своей реализации, широко применяются там, где не требуется высокое качество управления движением ЭП, например, для пуска, реверса и торможения двигателей.

Разомкнутые схемы, осуществляя управление ЭП, обеспечивают и защиту самого ЭП, питающей сети и технологического оборудования при возникновении различных ненормальных режимов работы — коротких замыканий, перегрузок двигателей, исчезновения питающего напряжения или обрыва фазы питающей сети и др. Для такой защиты применяются соответствующие аппараты и устройства, находящиеся во взаимодействии с устройствами управления двигателями. В разомкнутых схемах управления главным образом используется релейно-контакторная аппаратура, в состав которой входят командные маломощные аппараты, силовые коммутационные аппараты с ручным и дистанционным управлением, а также реле управления и защиты.

Автоматизация разомкнутых схем управления осуществляется с использованием информации о времени, скорости, тока, ЭДС, положения вала, получаемой с помощью соответствующих датчиков.

Типовая схема пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в функции времени. Эта схема (рис. 7.32, а) включает в себя кнопки управления $SB1$ (пуск) и $SB2$ (останов, стоп ДПТ), линейный контактор $KM1$, обеспечивающий подключение двигателя к сети, и контактор ускорения $KM2$ для выключения (закорачивания) пускового резистора R_A . В качестве датчика времени в схеме используется электромагнитное реле времени KT . При подключении схемы к источнику питания проис-

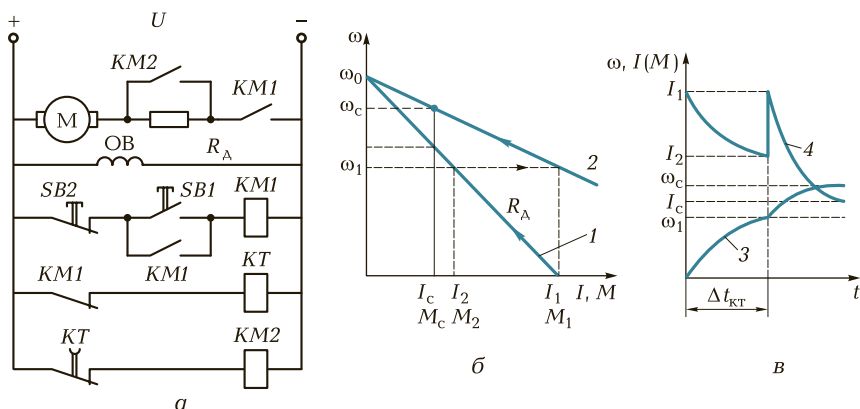


Рис. 7.32. Схема пуска двигателя в одну ступень по принципу времени (а), механические характеристики (б) и графики скорости, тока и момента (в): 1 — реостатная; 2 — естественная; 3 и 4 — графики скорости тока и момента при пуске соответственно

ходит возбуждение ДПТ и срабатывает реле *КТ*, размыкая свой контакт в цепи катушки контактора *КМ2* и подготавливая двигатель к пуску.

При нажатии кнопки *SB1* получает питание контактор *КМ1*, который своим главным контактом подключает двигатель к источнику питания. Двигатель начинает разбег с включенным резистором R_A в цепи якоря. Одновременно замыкающий блок-контакт контактора *КМ1* шунтирует кнопку *SB1* и она может быть отпущена, а размыкающий блок-контакт *КМ1* разрывает цепь питания катушки реле времени *КТ*. После прекращения питания катушки реле времени через интервал времени Δt_{KT} , называемый выдержкой времени, размыкающий контакт *КТ* замкнется в цепи катушки контактора *КМ2*, последний включится и главным контактом закоротит пусковой резистор R_A в цепи якоря. Таким образом, при пуске двигатель в течение времени Δt_{KT} разгоняется по искусственной характеристике 1 (рис. 7.32, б), а после шунтирования резистора R_A — по естественной характеристике 2. Сопротивление резистора R_A выбирается таким образом, чтобы в момент включения двигателя ток I_1 в цепи и соответственно момент M_1 не превосходили допустимого уровня.

За время Δt_{KT} после начала пуска скорость вращения двигателя (кривая 3) достигает значения ω_1 , а ток в цепи якоря (кривая 4) снижается до уровня I_2 (рис. 7.32, в). После шунтирования резистора R_A ток в цепи якоря скачком возрастает до значения I , не

превышающего допустимого уровня. Изменение скорости, тока и момента во времени происходит по экспоненте.

Типовая схема пуска двигателя постоянного тока в одну ступень в функции времени и динамического торможения в функции ЭДС (рис. 7.33). Управление ДПТ при пуске в этом случае происходит по аналогии со схемой, показанной на рис. 7.32. Отметим только, что при включении двигателя и работе его от источника питания размыкающий контакт линейного контактора *КМ* в цепи контактора торможения *КМ2* разомкнут, что предотвращает перевод двигателя в режим торможения.

Торможение осуществляется нажатием кнопки *SB2*. При этом контактор *КМ*, потеряв питание, отключает двигатель от источника питания и замыкает своим контактом цепь питания катушки контактора *КМ2*. Последний под действием наведенной в якоре ЭДС срабатывает и замыкает якорь *М* двигателя на резистор торможения $R_{\Delta 2}$. Процесс динамического торможения происходит до тех пор, пока при небольшой скорости ДПТ его ЭДС не станет меньше напряжения отпущения контактора *КМ2*, который отключится, и схема вернется в исходное положение.

Типовая схема пуска ДПТ с последовательным возбуждением в функции тока. В этой схеме (рис. 7.34) катушка реле тока *КА* включена в цепь якоря *М*, а размыкающий контакт — в цепь пита-

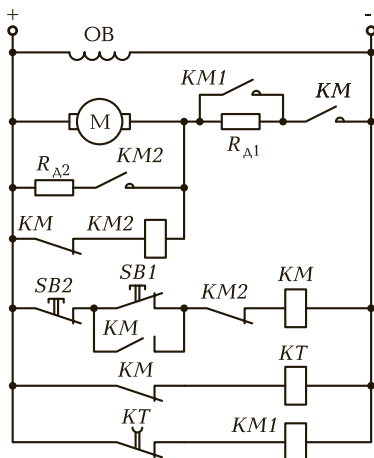


Рис. 7.33. Схема пуска двигателя в одну ступень по принципу времени и динамического торможения по принципу ЭДС

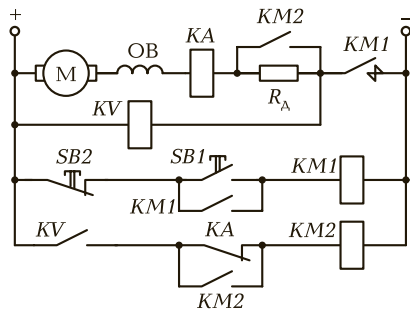


Рис. 7.34. Схема пуска двигателя по принципу тока

ния контактора ускорения $KM2$. В схеме используется также дополнительное блокировочное реле KV с временем срабатывания больше, чем у реле KA .

При нажатии на кнопку $SB1$ срабатывает контактор $KM1$, двигатель подключается к источнику питания и начинает свой разбег. Бросок тока в якорной цепи после замыкания главного контакта контактора $KM1$ вызывает срабатывание реле тока KA , которое размыкает свой размыкающий контакт в цепи контактора $KM2$. Через некоторое время после этого срабатывает реле KV и замыкает свой замыкающий контакт в цепи контактора $KM2$, подготавливая его к включению.

По мере разбега двигателя ток якоря снижается до значения, при котором отключается реле тока, замыкая свой размыкающий контакт в цепи катушки контактора $KM2$. Последний срабатывает, его главный контакт закорачивает пусковой резистор R_A в цепи якоря, а вспомогательный контакт шунтирует контакт реле тока KA . Поэтому вторичное включение реле тока KA после закорачивания резистора R_A и броска тока не вызывает отключения контактора $KM2$ и двигатель продолжает разбег по своей естественной характеристике.

Типовые релейно-контакторные схемы управления ЭП включают в себя элементы блокировок, защит, сигнализации, а также элементы связи с технологическим оборудованием. Для унификации схемных решений электротехническая промышленность выпускает стандартные станции, блоки и панели управления, специализированные по видам ЭП рабочих машин и механизмов, их функциональным возможностям, условиям эксплуатации, роду тока и др. Так, для управления крановыми механизмами выпускаются различные крановые панели, для лифтов разработаны типовые шкафы управления, для ЭП конвейеров выпускаются типовые станции управления и т. д.

7.15. ЗАМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Замкнутые схемы применяются в тех случаях, когда требуется обеспечить управление движением исполнительных органов рабочих машин с высоким качеством (большие диапазоны регулирования скорости и точность ее поддержания, заданное качество переходных процессов и необходимая точность остановки, а так-

же высокая экономичность или оптимальное функционирование технологического оборудования и самого ЭП).

Замкнутые схемы ЭП строятся по принципу компенсации внешних возмущений и принципу отклонения, называемому также принципом обратной связи.

Принцип компенсации рассмотрим на примере компенсации наиболее характерного внешнего возмущения ЭП — момента нагрузки M_c при регулировании его скорости ω (рис. 7.35, а). Основным признаком такой замкнутой структуры ЭП является наличие цепи, по которой на вход ЭП вместе с задающим сигналом скорости $U_{з.с}$ подается сигнал, пропорциональный моменту нагрузки:

$$U_m = k_m M_c,$$

где k_m — коэффициент пропорциональности.

В результате управление ЭП осуществляется суммарным сигналом U_Δ , который, автоматически изменяясь при колебаниях момента нагрузки, обеспечивает поддержание скорости ЭП на заданном уровне.

Несмотря на эффективность, управление ЭП по схеме, показанной на рис. 7.35, а, осуществляется редко из-за отсутствия простых и надежных датчиков момента нагрузки M_c (возмущающего воздействия). Поэтому в большинстве замкнутых схем используется **принцип отклонения (принцип обратной связи)**, который характеризуется наличием цепи обратной связи, соединяющей выход ЭП с его входом. В данном случае при регулировании скорости используется цепь обратной связи (рис. 7.35, б), по которой информация о текущем значении скорости (сигнал обратной связи $U_{о.с} = k_{о.с}\omega$) подается на вход ЭП, где он вычитается из сигнала задания скорости $U_{з.с}$. Управление осуществляется сигналом отклонения $U_\Delta = U_{з.с} - U_{о.с}$ (его также называют сигналом рассогласования или ошибки), который при отличии скорости от заданной

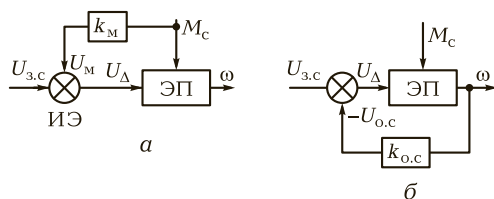


Рис. 7.35. Структуры замкнутых электроприводов:

а — с компенсацией возмущения; б — с обратной связью

соответственно автоматически изменяется и с помощью системы управления ЭП устраняет эти отклонения.

При необходимости регулирования других координат ЭП или рабочей машины используются обратные связи по этим координатам.

Все применяемые в замкнутом ЭП обратные связи подразделяются на положительные и отрицательные, линейные и нелинейные, жесткие и гибкие. *Положительной* называется такая обратная связь, сигнал которой направлен согласно (т. е. складывается) с задающим сигналом, сигнал же *отрицательной* связи направлен ему встречно («–» на рис. 7.35, б).

Жесткая обратная связь действует как в установившемся, так и переходном режиме ЭП. Сигнал *гибкой* обратной связи вырабатывается только в переходных режимах ЭП и служит для обеспечения требуемого их качества, например устойчивости движения, допустимого перерегулирования и др.

Для *линейной обратной связи* характерна пропорциональная зависимость между регулируемой координатой и сигналом обратной связи, при реализации же *нелинейной* связи эта зависимость нелинейна.

В зависимости от вида регулируемой координаты в ЭП используются связи по скорости, положению, току, напряжению, магнитному потоку, ЭДС.

Для обеспечения заданных хода и качества технологических процессов на ЭП кроме указанных «внутренних» обратных связей часто подаются сигналы различных технологических датчиков, например температуры, натяжения, усилия резания, давления, расхода и др. В этом случае ЭП вместе с рабочей машиной или механизмом, реализующим технологический процесс или операцию, образуют систему автоматического регулирования (рис. 7.36). В этой системе ЭП является силовым регулирующим устройством, выходная координата которого $X_{\text{вых}}$ (например, скорость) является управляющим воздействием для рабочей машины *РМ* и обеспечивает заданный ход технологического процесса при изменениях как его задающего сигнала $X_{3,т}$, так и возмущающего воздействия $X_{\text{возм2}}$. Сигналом задания для ЭП в этом случае является сигнал отклонения (рассогласования) между задающим сигналом технологического параметра $X_{3,т}$ и сигналом технологической обратной связи $X_{т.о.с.}$. Отметим, что сигналов технологических обратных связей может быть несколько, а для выработки задающего сигнала для ЭП используются ЭВМ или микропроцессоры.

Как уже отмечалось, для управления движением исполнительного органа иногда требуется регулировать несколько координат

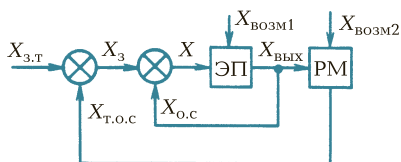


Рис. 7.36. Схема регулирования технологической переменной

ЭП, например ток (момент) и скорость. В этом случае замкнутые ЭП выполняются по одной из следующих структурных схем.

Схема ЭП с общим усилителем (рис. 7.37). Принятые на схеме обозначения элементов соответствуют общей схеме ЭП на рис. 5.1, за исключением электродвигателя, представленного для удобства анализа в виде двух частей — электрической ЭЧД и механической МЧД. Схема обеспечивает регулирование двух координат ЭП — скорости и тока (момента). В этой схеме сигналы обратных связей по току $U_{о.с.т}$ и скорости $U_{о.с.с}$ подаются на вход управляющего устройства УУ вместе с задающим сигналом скорости $U_{з.с}$, где алгебраически суммируются. Схема отличается простотой реализации, но не позволяет регулировать координаты ЭП независимо друг от друга. За счет использования нелинейных обратных связей, называемых в теории ЭП отсечками, удастся в некотором диапазоне осуществлять их независимое регулирование, что частично устраняет указанный недостаток.

Схема с подчиненным регулированием координат (рис. 7.38) принципиально отличается от предыдущей. В ней регулирование каждой координаты осуществляется собственными регуляторами (тока РТ, скорости РС), которые вместе с соответствующими обратными связями образуют замкнутые контуры. Эти контуры располагаются таким образом, чтобы входным (задающим) сигналом для контура тока $U_{з.с}$ являлся выходной сигнал внешнего по отношению к нему контура скорости. Таким образом, внутренний кон-

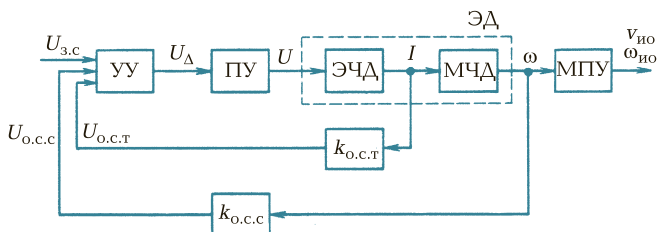


Рис. 7.37. Схема электропривода с общим усилителем

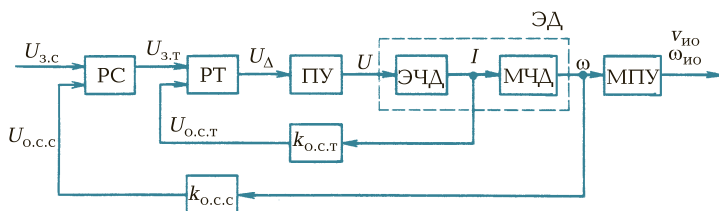


Рис. 7.38. Схема электропривода с подчиненным регулированием координат

тур тока будет подчинен внешнему контуру скорости — основной регулируемой координате ЭП.

Основное достоинство такой схемы заключается в возможности оптимальной настройки регулирования каждой координаты, в силу чего она нашла широкое применение в ЭП. Кроме того, подчинение контура тока контуру скорости позволяет упростить процесс ограничения тока и момента, для чего необходимо лишь поддерживать на соответствующем уровне сигнал на выходе регулятора скорости (сигнал задания уровня тока).

Для регулирования положения вала двигателя в схемы, показанные на рис. 7.37 и 7.38, необходимо ввести соответствующую обратную связь.

Рассмотренные схемы отражают структуру управления отдельно взятой рабочей машины. Многие же реальные технологические процессы предусматривают объединение в единый комплекс нескольких взаимодействующих рабочих машин и механизмов. Такие технологические комплексы автоматизируются, и ЭП при этом выполняет основную функцию. За счет соответствующего управления им обеспечивается требуемая последовательность всех технологических операций, достигаются оптимальные режимы работы промышленного оборудования и самого ЭП, осуществляются необходимые блокировки и защиты.

Для управления технологическими комплексами широко используются ЭВМ. Они позволяют быстро проводить обработку большого объема информации о ходе технологического процесса, вырабатывать управляющие воздействия на ЭП рабочих машин и механизмов в соответствии с заданной программой. Особенно широкие возможности открываются при использовании микропроцессорной техники управления, позволяющей осуществлять автоматизацию как сложных технологических процессов в целом, так и отдельных производственных операций и циклов.

Замкнутые схемы управления электропривода с двигателями постоянного тока. Характеристики разомкнутых ЭП, построенных по системе «преобразователь — двигатель» (П — Д), имеют относительно невысокую жесткость из-за влияния внутреннего сопротивления преобразователя. Для получения значительных диапазонов и высокой точности регулирования скорости требуются более жесткие характеристики, которые возможно обеспечить лишь в замкнутой системе П — Д. Кроме того, характеристики разомкнутой системы не обеспечивают точного регулирования (или ограничения) тока и момента, что также требует перехода к замкнутой системе П — Д. Рассмотрим принципы построения и действия замкнутых схем регулирования скорости, тока, момента и положения двигателя с использованием различных обратных связей.

Замкнутая система П — Д с отрицательной обратной связью по скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Основу такой системы (рис. 7.39, а) составляет ра-

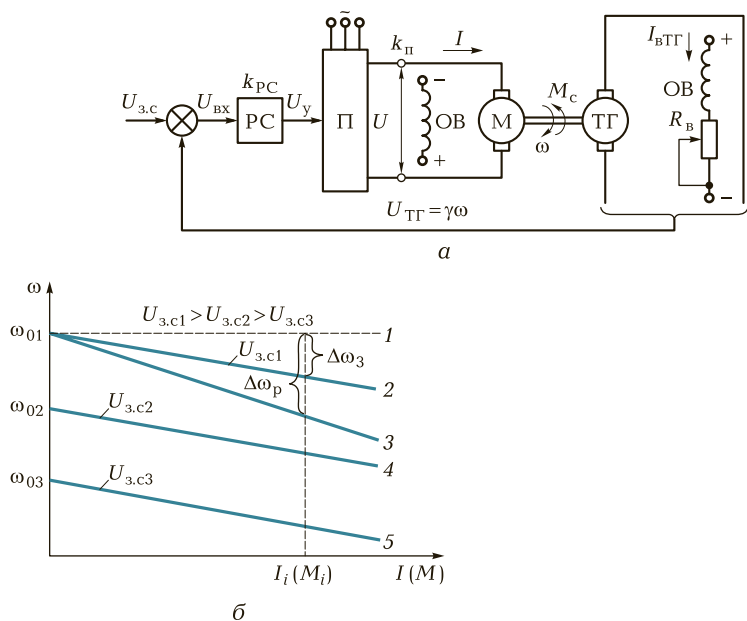


Рис. 7.39. Схема (а) и характеристики (б) замкнутого ЭП с отрицательной обратной связью по скорости:

1 — предельная по жесткости; 2, 4 и 5 — в замкнутой схеме; 3 — в разомкнутой схеме

замкнутая схема П — Д. На валу ДПТНВ находится датчик скорости — тахогенератор ТГ, выходное напряжение которого $U_{ТГ} = \gamma\omega$ пропорционально скорости ДПТ и является сигналом обратной связи. Коэффициент пропорциональности γ называется коэффициентом обратной связи по скорости и может регулироваться за счет изменения тока возбуждения тахогенератора $I_{БТГ}$.

Сигнал обратной связи $U_{ТГ} = \gamma\omega = U_{o.c}$ сравнивается с задающим сигналом скорости $U_{з.с}$, и их разность в виде сигнала рассогласования (ошибки) $U_{вх}$ подается на вход регулятора скорости РС, который с коэффициентом $k_{РС}$ сигнал рассогласования $U_{вх}$ передает в виде сигнала управления U_y на вход преобразователя П.

Для получения характеристик ДПТ в замкнутой системе воспользуемся выражениями (7.30) и (7.31), схемой, показанной на рис. 7.11, а также соотношениями (см. рис. 7.39, а):

$$U_{вх} = U_{з.с} - \gamma\omega; \quad (7.44)$$

$$U_y = k_{РС} U_{вх}; \quad (7.45)$$

$$E_{п} = k_{п} U_y, \quad (7.46)$$

где $E_{п}$ и $k_{п}$ — соответственно ЭДС и коэффициент усиления преобразователя.

Заменяя в (7.30) и (7.31) последовательно $E_{п}$ на выражение (7.46), далее U_y на выражение (7.45) и затем $U_{вх}$ на выражение (7.44), после несложных преобразований получим следующие формулы для характеристик ДПТ в замкнутой системе:

$$\omega = \frac{k_y k_{п} U_{з.с}}{c(1 + k_c)} - \frac{I(R_{я} + R_{п})}{c(1 + k_c)} = \omega_0 - \Delta\omega; \quad (7.47)$$

$$\omega = \frac{k_y k_{п} U_{з.с}}{c(1 + k_c)} - \frac{M(R_{я} + R_{п})}{c^2(1 + k_c)} = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (7.48)$$

где $c = k\Phi_{ном}$; $k_c = \gamma k_{РС} k_{п} / c$ — общий коэффициент системы П — Д.

Для анализа жесткости полученных характеристик сопоставим перепады скорости в разомкнутой $\Delta\omega_p$ и замкнутой $\Delta\omega_3$ системах при одном и том же токе или моменте. Согласно (7.30), (7.31), (7.47) и (7.48)

$$\Delta\omega_p = I(R_{я} + R_{п}) / c; \quad (7.49)$$

$$\Delta\omega_3 = I(R_{я} + R_{п}) / (c(1 + k_c)) = \Delta\omega_p (1 + k_c). \quad (7.50)$$

Так как $k_c > 0$, то $\Delta\omega_3 < \Delta\omega_p$, т.е. всегда жесткость характеристик в замкнутой системе больше жесткости характеристик в разомкнутой системе. Сами характеристики, показанные на рис. 7.39, б, представляют собой прямые параллельные линии 2, 4 и 5, расположение которых определяется уровнем задающего сигнала по скорости $U_{3.c}$ и соответственно скоростью холостого хода ω_0 . Здесь же для сравнения приведена более мягкая характеристика ДПТ в разомкнутой системе (прямая 3).

Для нахождения предельной по жесткости характеристики будем увеличивать коэффициент усиления системы k_c до бесконечности. Из (7.50) видно, что при $k_c \rightarrow \infty$ $\Delta\omega_3 \rightarrow 0$, т.е. в пределе в данной замкнутой системе может быть получена абсолютно жесткая характеристика (штриховая прямая 1).

Рассмотрим физическую сторону процесса регулирования скорости в данной системе. Предположим, что ДПТ работает под нагрузкой в установившемся режиме и по каким-то причинам увеличился момент нагрузки M_c . Так как развиваемый ДПТ момент становится меньше момента нагрузки, его скорость начинает снижаться и соответственно будет снижаться сигнал обратной связи по скорости $U_{ГТ} = \gamma\omega$, что в свою очередь согласно (7.44)...(7.46) вызовет увеличение сигналов рассогласования $U_{вх}$ и управления U_y и приведет к повышению ЭДС преобразователя, а следовательно, напряжения и скорости ДПТ. При уменьшении момента нагрузки обратная связь будет действовать в другом направлении, приводя к снижению ЭДС преобразователя.

Таким образом, благодаря наличию обратной связи осуществляется автоматическое регулирование ЭДС преобразователя, а значит, и подводимого к ДПТ напряжения, за счет чего повышается жесткость характеристик ЭП. В разомкнутой же системе при изменении момента нагрузки ЭДС преобразователя не изменяется, в результате чего жесткость характеристик электропривода меньше.

Регулирование (ограничение) тока и момента двигателя постоянного тока с помощью нелинейной отрицательной обратной связи по току (рис. 7.40, а). В качестве датчика тока в этой системе ЭП используется шунт с сопротивлением $R_{ш}$, падение напряжения на котором пропорционально току якоря I . В результате сигнал обратной связи по току

$$U_{o.t} = \beta I, \quad (7.51)$$

где β — коэффициент обратной связи по току, Ом.

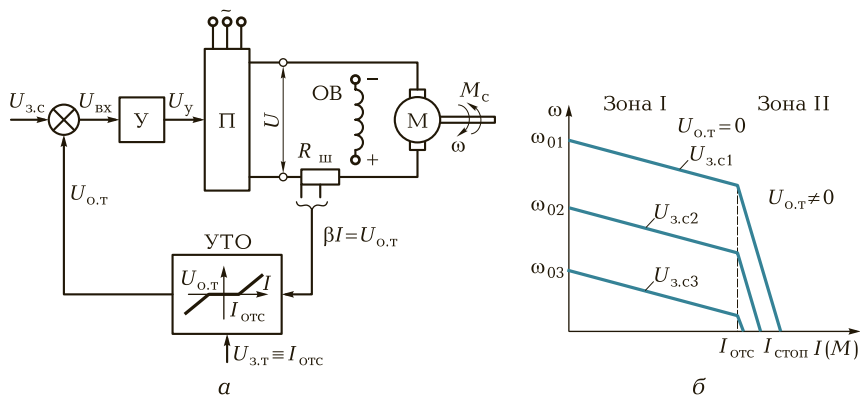


Рис. 7.40. Схема (а) и характеристики (б) замкнутого ЭП с отрицательной обратной связью по току с отсечкой

Отметим, что в качестве резистора $R_{ш}$ нередко используется обмотка дополнительных полюсов или компенсационная обмотка двигателя.

Сигнал обратной связи $U_{o.t}$ поступает на узел токоограничения УТО, называемый также узлом токовой отсечки, вместе с сигналом задания тока $U_{3.t}$, определяющим уровень тока отсечки $I_{отс}$, с которого начинается регулирование (ограничение) тока.

Работа УТО в соответствии с его характеристикой $U_{o.t}(I)$ (рис. 7.40, а) происходит следующим образом. При токе в якоре меньше заданного тока отсечки, т. е. пока $I < I_{отс}$, сигнал обратной связи на выходе УТО равен нулю. Другими словами, ЭП в диапазоне тока якоря от 0 до $I_{отс}$ является разомкнутым и имеет характеристики, изображенные на рис. 7.40, б в зоне I. При $I > I_{отс}$ на выходе УТО появляется сигнал отрицательной обратной связи $U_{o.t} = \beta I$, ЭП становится замкнутым и начинает работать в соответствии с характеристиками в зоне II. Для пояснения вида характеристик ЭП в этой зоне запишем выражение для сигнала рассогласования:

$$U_{вх} = U_{3.c} - \beta I. \tag{7.52}$$

Из (7.52) видно, что при увеличении тока I сигнал $U_{вх}$ уменьшается, что в соответствии с (7.45) и (7.46) вызовет уменьшение сигналов U_y и $E_{п}$. При этом уменьшается напряжение на двигателе U и соответственно снижается ток в якоре двигателя. Характеристики двигателя становятся крутопадающими (мягкими), что и отражает эффект регулирования (ограничения) тока и соответственно

момента. При увеличении коэффициента усиления системы характеристики в зоне II все ближе приближаются к вертикальным линиям. Уровень ограничения тока определяется задающим сигналом (уставкой) $U_{з.т.}$. Ток при нулевой скорости двигателя называется током стопорения $I_{стоп}$.

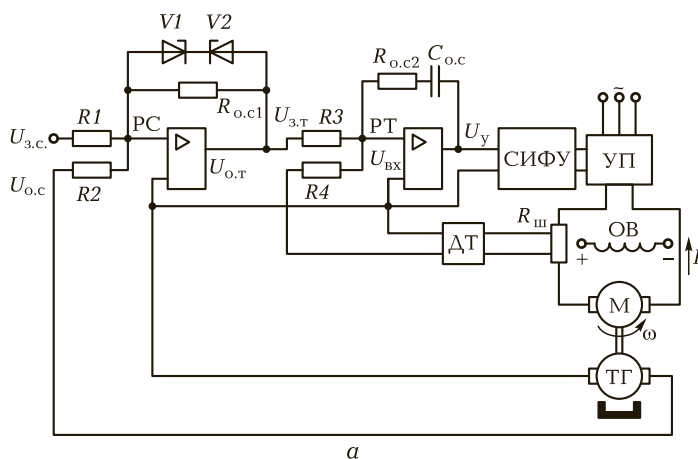
Замкнутые электроприводы с подчиненным регулированием координат. Эффективное и качественное регулирование координат в системе П—Д обеспечивает принцип подчиненного регулирования, реализуемый по структурной схеме, показанной на рис. 7.38. Напомним, что этот принцип предусматривает регулирование каждой координаты с помощью своего отдельного регулятора и соответствующей обратной связи, т. е. регулирование каждой координаты происходит в собственном замкнутом контуре и требуемые характеристики ЭП в статике и динамике можно получить за счет выбора схемы и параметров регулятора этой координаты и цепи ее обратной связи.

Управление внутренним контуром с помощью выходного сигнала внешнего контура определяет еще одно ценное свойство таких систем. Оно заключается в возможности простыми средствами ограничивать любую регулируемую координату, например ток и момент, на заданном уровне. Для этого требуется всего лишь ограничить сигнал, поступающий с внешнего контура.

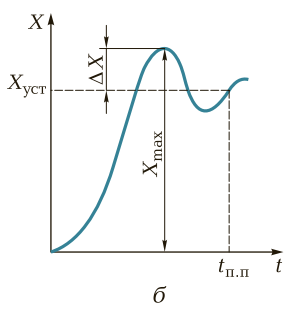
Рассмотрим схему ЭП (рис. 7.41, а) с подчиненным регулированием, выходной регулируемой координатой которой является скорость. Управляющая часть схемы состоит из двух замкнутых контуров: контура регулирования тока (момента), содержащего регулятор тока РТ и датчик тока ДТ, и контура регулирования скорости, содержащего регулятор скорости РС и датчик скорости (тахогенератор) ТГ.

Регуляторы тока и скорости в этой схеме ЭП выполняются на базе операционных усилителей (ОУ). Включение в цепь задающего сигнала скорости $U_{з.с}$ регулятора скорости РС и его обратной связи резисторов $R1$ и $R_{о.с1}$ обеспечивает изменение (усиление или ослабление) этого сигнала с коэффициентом $k_1 = R_{о.с1}/R1$. Аналогично изменение сигнала обратной связи по скорости $U_{о.с}$ происходит с коэффициентом $k_2 = R_{о.с1}/R2$. Такой регулятор получил название пропорционального регулятора скорости (П-регулятор).

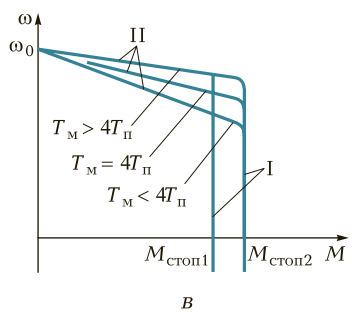
При включении в цепь ОУ конденсаторов (реактивных электрических элементов) его функциональные возможности по преобразованию электрических сигналов становятся шире. Так, включение в цепь обратной связи регулятора тока РТ конденсато-



а



б



в

Рис. 7.41. Схема (а), график переходного процесса (б) и статические характеристики (в) замкнутого ЭП с подчиненным регулированием координат

ра $C_{o.c}$ последовательно с резистором $R_{o.c2}$ позволяет получить на выходе РТ сигнал в виде суммы двух составляющих:

$$U_y = k_3 U_{вх} + k_4 U_{вх} dt,$$

где k_3 и k_4 — коэффициенты усиления сигналов.

Здесь сигнал U_y содержит пропорциональную и интегральную составляющие входного сигнала $U_{вх}$, т. е. РТ является в этом случае пропорционально-интегральным (П — И) регулятором.

По каким же критериям и условиям выбираются схема и параметры цепей того или иного регулятора? Основным условием здесь является желаемый (заданный) характер переходных процессов при регулировании координат. Из всех возможных их видов обычно выбираются переходные процессы с затухающими колебаниями (рис. 7.41, б), что является оптимальным в том смыс-

ле, что позволяет обеспечить устойчивость этих процессов при небольших длительностях и перерегулированиях.

Распространенным методом настройки регуляторов является так называемый технический оптимум, при котором перерегулирование $\Delta X = X_{\max} - X_{\text{уст}}$ составляет 4,3 % установившегося уровня, а время переходного процесса $t_{\text{п.п}} = 4,1T_{\text{п}}$, где $T_{\text{п}}$ — электромагнитная постоянная времени тиристорного преобразователя, принимаемая обычно равной 0,01 с. В теории ЭП разработаны соответствующие методы расчета параметров цепей регуляторов скорости и тока, обеспечивающих заданный характер регулирования их координат.

Как уже отмечалось, схема подчиненного регулирования позволяет простыми средствами ограничить координаты ЭП заданным уровнем. В схеме, показанной на рис. 7.41, а, для этой цели в цепь обратной связи РС включены стабилитроны V1 и V2, которые, ограничивая выходное напряжение РС, являющееся входным задающим сигналом (уставкой) тока $U_{3,т}$, ограничивают тем самым ток и момент двигателя заданным уровнем.

На рис. 7.41, в показаны статические характеристики ЭП с подчиненным регулированием координат и настройкой на технический оптимум. Их особенностью является наличие вертикального участка I, на котором обеспечивается ограничение тока и момента, и участка II с жесткими характеристиками, наклон которых зависит от соотношения двух постоянных времени — электромеханической двигателя $T_{\text{м}}$ и электромагнитной преобразователя $T_{\text{п}}$.

В схемах подчиненного регулирования используется и другой критерий настройки регуляторов по так называемому симметричному оптимуму, который позволяет получить абсолютно жесткие статические характеристики на участке II, но переходные процессы в этом случае характеризуются большим перерегулированием, достигающим до 55 %.

При настройке по симметричному оптимуму регулятор скорости РС выполняется пропорционально-интегральным.

Отметим в заключение еще раз, что в силу своих больших функциональных возможностей схемы с подчиненным регулированием координат нашли очень широкое применение в регулируемых ЭП как постоянного, так и переменного тока.

Схема электрического привода с использованием микропроцессора. Рассмотрим схему ЭП с двигателем постоянного тока для регулирования положения исполнительного органа робототехнического устройства с использованием микропроцессорного управ-

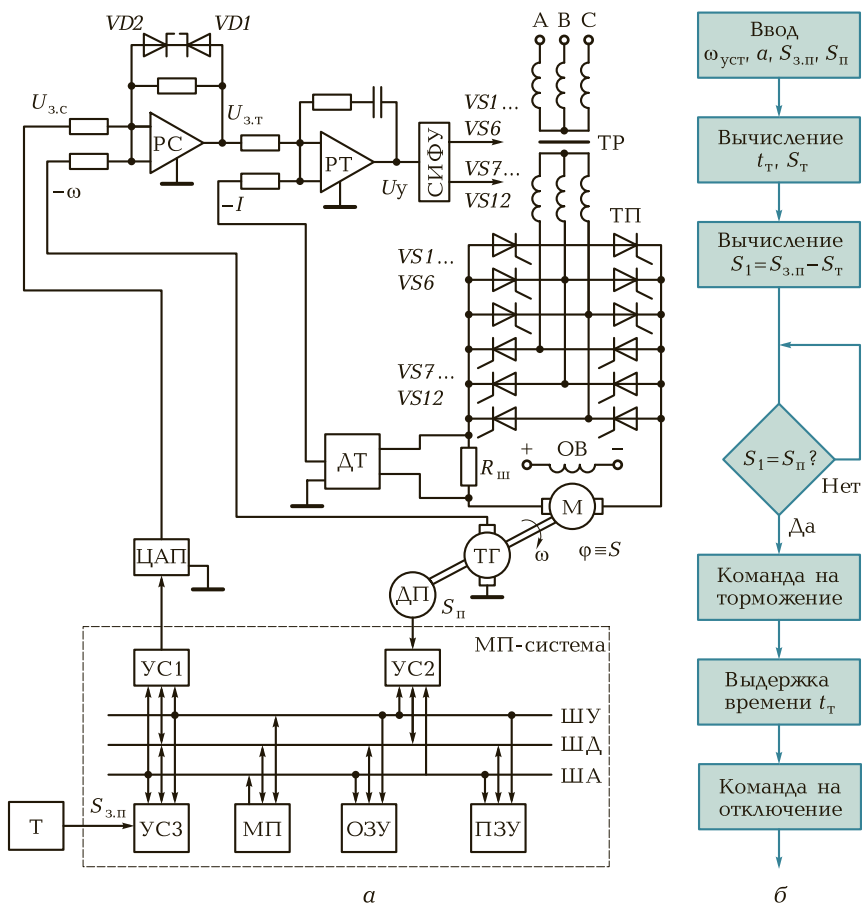


Рис. 7.42. Схема (а) и алгоритм работы (б) ЭП с микропроцессорным управлением

ления (рис. 7.42, а). Этот ЭП должен обеспечивать перемещение и точное позиционирование исполнительного органа робота, для чего в нем используется обратная связь по положению. Для обеспечения высокой точности позиционирования в ЭП осуществляется также регулирование тока (момента) и скорости ДПТ.

Схема, показанная на рис. 7.42, а, является характерным примером выполнения подобных схем с применением как аналоговых, так и цифровых узлов и устройств управления. Такие схемы, получившие название цифроаналоговых, существенно улучшают характеристики ЭП.

Силовая часть ЭП включает в себя трехфазный мостовой реверсивный тиристорный преобразователь ТП, питаемый от трансформатора ТР. Схема управления построена по принципу подчиненного регулирования координат.

Регулирование тока производится аналоговым пропорционально-интегральным регулятором тока РТ, на вход которого поступают сигнал обратной связи по току от датчика тока ДТ и сигнал задания тока $U_{3,ТГ}$ с выхода регулятора скорости.

Аналоговый пропорциональный регулятор скорости РС формирует сигнал задания тока $U_{3,Т}$ на основе своего задающего сигнала $U_{3,СГ}$ поступающего на него с внешнего контура положения, и сигнала обратной связи по скорости, вырабатываемого тахогенератором ТГ. Стабилитроны $VD1$ и $VD2$ ограничивают сигнал на выходе РС, т. е. обеспечивают ограничение тока и момента двигателя.

Регулирование положения осуществляется с помощью микропроцессорной системы, включающей в себя микропроцессор МП, устройства памяти ОЗУ и ПЗУ, устройства сопряжения УС1...УС3, цифровой датчик положения ДП и цифроаналоговый преобразователь ЦАП. Сигнал задания положения $S_{3,П}$ поступает (задается) с терминала Т, подключаемого к микропроцессорной системе через УС3.

Работа цифрового регулятора положения на основе микропроцессорной системы может основываться на одном из двух принципов. Первый из них предусматривает реализацию статической характеристики регулятора в виде параболы, которая обеспечивает оптимальный график движения ЭП, показанный на рис. 6.3. Такой регулятор можно реализовать программным путем, записав в ПЗУ эту нелинейную характеристику.

Второй принцип работы РП основывается на вычислении момента начала торможения ЭП, что также позволяет получить показанные на рис. 6.3 кривые движения. Рассмотрим этот способ подробнее.

Реализация способа основана на том, что при известных установившейся скорости $\omega_{уст}$ и ускорении $a = (M - M_c)/J$, где J — момент инерции ЭП, могут быть рассчитаны время t_T и путь S_T на участке торможения ЭП в конце отработки заданного перемещения $S_{3,П}$ по следующим формулам:

$$t_T = \omega_{уст}/a; S_T = \omega_{уст}^2/(2a). \quad (7.53)$$

Алгоритм работы микропроцессорной системы при выработке сигнала на торможение показан на рис. 7.42, б. Для его реализа-

ции в микропроцессорную систему вводятся данные по величинам $\omega_{уст}$, a , $S_{з.п}$ и сигнал датчика положения $S_{п}$, пропорциональный текущему положению вала двигателя и исполнительного органа. Микропроцессорная система производит вычисление по (7.53) величин t_T и S_T и разности $S_1 = S_{з.п} - S_T$. Затем сопоставляется значение разности S_1 с сигналом датчика положения $S_{п}$. Как только S_1 станет равной $S_{п}$, от микропроцессорной системы выдается команда на торможение ЭП, начинается отсчет выдержки времени t_T и по истечении этого времени выработается команда на его отключение.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите основную схему включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
2. Какие допущения принимаются при выводе формул для характеристик двигателя постоянного тока?
3. Назовите виды и соответствующие признаки энергетических режимов двигателя.
4. Назовите основные способы регулирования координат ЭП с двигателем постоянного тока независимого возбуждения.
5. Охарактеризуйте основные способы регулирования скорости ДПТНВ.
6. Что такое пусковая диаграмма и как она строится?
7. Опишите схему и принцип действия тиристорного управляемого выпрямителя.
8. Каковы достоинства и недостатки системы Г—Д?
9. Каковы достоинства и недостатки системы ТП—Д?
10. В чем цель и сущность формирования статических и динамических характеристик ЭП?
11. Каковы схема и характеристики системы «источник тока—двигатель»?
12. В чем сущность импульсного регулирования координат ЭП?
13. Что такое универсальные характеристики двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения?
14. В чем особенности схемы включения и характеристик ДПТПВ?
15. Назовите способы регулирования скорости ДПТПВ.
16. Назовите способы торможения ДПТПВ.
17. В чем особенности схемы включения и характеристик ДПТСВ?

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

8.1. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

ЭП с трехфазным асинхронным двигателем (АД) является самым массовым видом привода в промышленности, коммунальном и сельском хозяйстве. Такое положение определяется простотой изготовления и эксплуатации АД, меньшими по сравнению с ДПТ массой, габаритными размерами и стоимостью, а также высокой надежностью в работе.

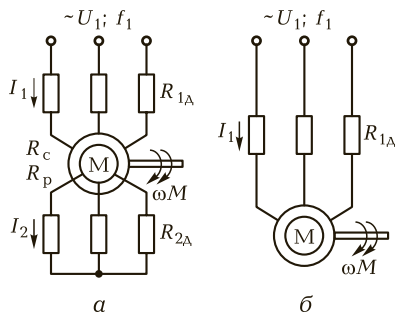
Основной областью применения АД вплоть до недавнего времени являлся нерегулируемый ЭП. В последние годы в связи с разработкой и серийным выпуском электротехнической промышленностью тиристорных преобразователей частоты и напряжения стали создаваться регулируемые асинхронные ЭП с характеристиками, не уступающими по своим показателям ЭП постоянного тока. Применение таких ЭП в силу преимуществ АД отражает прогрессивную тенденцию развития автоматизированных ЭП.

Трехфазный АД имеет обмотку статора, подключаемую к трехфазной сети переменного тока с напряжением U_1 и частотой f_1 , и обмотку ротора, которая может быть выполнена в двух вариантах.

Первый вариант предусматривает выполнение обычной трехфазной обмотки из проводников с выводами на три контактных кольца. Такая конструкция соответствует АД с фазным ротором (рис. 8.1, а), она позволяет включать в роторную цепь различные электротехнические элементы, например резисторы для регулирования скорости, тока и момента ЭП, и создавать специальные схемы включения АД.

Второй вариант — это выполнение обмотки заливкой алюминия в пазы ротора, в результате чего образуется конструкция, известная под названием «беличья клетка». Схема АД с такой обмот-

Рис. 8.1. Схема включения асинхронного двигателя с фазным (а) и короткозамкнутым (б) роторами



кой, не имеющей выводов и получившей название короткозамкнутой, показана на рис. 8.1, б.

Для получения выражений электромеханической и механической характеристик АД используется его схема замещения, на которой цепи статора и ротора представлены своими активными и индуктивными сопротивлениями. Особенность схемы замещения АД состоит в том, что в ней ток, ЭДС и параметры цепи ротора пересчитаны (приведены) к цепи статора, что и позволяет изобразить эти две цепи на схеме соединенными электрически, хотя в действительности связь между ними осуществляется через электромагнитное поле. Приведение осуществляется с помощью коэффициента трансформации АД по ЭДС:

$$k = E_1/E_{2к} \approx 0,95U_{ф.ном}/E_{2к}, \quad (8.1)$$

где E_1 и $E_{2к}$ — фазные ЭДС статора и ротора при неподвижном роторе; $U_{ф.ном}$ — фазное номинальное напряжение сети.

Расчетные формулы приведения имеют вид

$$E'_2 = E_{2к} = E_1; I'_2 = I_2/k; R'_2 = R_{2к}^2; x'_2 = x_{2к}^2, \quad (8.2)$$

где штрихом обозначены приведенные значения.

В теории электрических машин разработаны и применяются две основные схемы замещения АД — более точная Т-образная и упрощенная П-образная. На рис. 8.2 показана П-образная схема замещения, которая в дальнейшем и используется при выводе формул для характеристик АД. На рис. 8.1 и 8.2 приняты следующие обозначения: $U_1, \dot{U}_ф$ — соответственно действующее значение линейного и комплексное фазного напряжения сети; $\dot{I}_1, \dot{I}_\mu, \dot{I}'_2$ — соответственно комплексные фазные токи статора, намагничивания и приведенный ток ротора; x_1, x'_2 — соответственно индуктивные сопротивления от потоков рассеяния фазы обмотки статора и приведенное фазы ротора; x_μ — индуктивное сопротив-

ление контура намагничивания; $R_c, R_{1\Delta}, R_1 = R_c + R_{1\Delta}$ — соответственно активные фазные сопротивления обмотки статора, добавочного резистора и суммарное сопротивление фазы статора; $R'_p, R'_{2\Delta}, R'_2 = R'_p + R'_{2\Delta}$ — соответственно активные приведенные к обмотке статора фазные сопротивления обмотки ротора, добавочного резистора и суммарное сопротивление фазы ротора; $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ — скольжение АД; $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ — угловая скорость магнитного поля АД (скорость идеального холостого хода); f_1 — частота питающего напряжения; p — число пар полюсов АД.

Как видно из рис. 8.2, ЭДС статора равна приведенной ЭДС ротора, а ток намагничивания I_m , определяющий магнитный поток АД, протекает под действием U_ϕ по отдельной цепи, состоящей из сопротивлений контура намагничивания x_m и R_m , и представляет собой векторную сумму токов статора и приведенного роторного, т. е. $\dot{I}_m = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$.

Электромеханическая характеристика $I'_2(s)$ АД описывается выражением, получаемым непосредственно из анализа рис. 8.2:

$$I'_2 = U_\phi / \sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + x_k^2}, \quad (8.3)$$

где $x_k = x_1 + x'_2$ — индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания.

В отличие от двигателя постоянного тока электромеханическая характеристика АД представляется в виде зависимости тока ротора от скольжения, а не от скорости ω , что является особенностью этих двигателей. Поэтому выражение для характеристики имеет компактную форму записи и более удобно для анализа и вычислений, а переход к зависимости вида $\omega(I'_2)$ осуществляется с помощью формулы

$$\omega = \omega_0(1 - s). \quad (8.4)$$

Для построения электромеханической характеристики АД проанализируем характерные точки этой зависимости и ее асимпто-

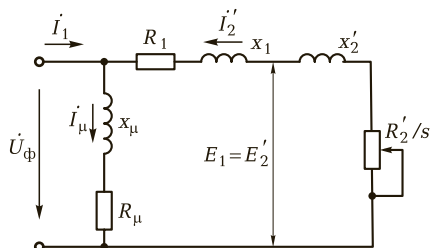
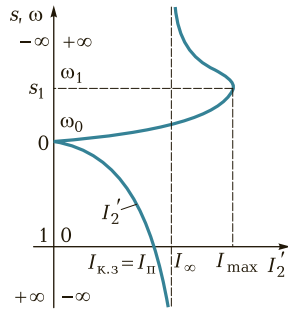


Рис. 8.2. П-образная схема замещения асинхронного двигателя

Рис. 8.3. Электромеханическая характеристика асинхронного двигателя



ты, придавая скольжению s и скорости ω различные значения в пределах $\pm\infty$:

$s = 0, \omega = \omega_0, I_2' = 0$ — точка идеального холостого хода;

$s = 1, \omega = 0, I_2' = I_{к.з} = U_{\phi} / \sqrt{(R_1 + R_2') + x_k^2}$ — точка короткого замыкания;

$s_1 = -R_2'/R_1, \omega_1 = \omega_0(1 + s_1), I_2' = I_{max} = U_{\phi}/x_k$ — точка максимального значения тока ротора, лежащая в области отрицательных скольжений;

$s \rightarrow \pm\infty, \omega \rightarrow \mp\infty, I_2' \rightarrow I_{\infty} = U_{\phi} / \sqrt{R_1^2 + x_k^2}$ — асимптота тока ротора при бесконечно большом увеличении скольжения и скорости.

На рис. 8.3 показана электромеханическая характеристика АД, причем по вертикальной оси указаны соответствующие друг другу скорость и скольжение АД, связанные соотношением (8.4).

Механическая характеристика АД. Потери мощности в цепи ротора, которые часто называют потерями скольжения, выраженные через механические координаты АД, представляют собой разность электромагнитной и полезной механической мощности, т. е.

$$\Delta P_2 = P_{эм} - P_2 = M\omega_0 - M\omega = M\omega s. \quad (8.5)$$

Потери мощности в роторе, выраженные через электрические величины, определяются как

$$\Delta P_2 = 3I_2'^2 R_2'. \quad (8.6)$$

Приравняв (8.5) и (8.6), получим

$$M = 3I_2'^2 R_2' / (\omega_0 s). \quad (8.7)$$

Подставив в (8.7) значение тока I_2' из (8.3), получим

$$M = 3U_{\phi}^2 R_2' / [\omega_0 s ((R_1 + R_2'/s)^2 + x_k^2)]. \quad (8.8)$$

Исследовав полученную зависимость $M(s)$ на экстремум, т. е. взяв производную dM/ds и приравняв ее к нулю, обнаружим наличие двух экстремальных точек момента и скольжения:

$$M_k = 3U_{\phi}^2 / [2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2})]; \quad (8.9)$$

$$s_k = \pm R_2' / \sqrt{R_1^2 + x_k^2}, \quad (8.10)$$

причем знак «плюс» здесь относится к области скольжения $s > 0$, а знак «минус» — к области $s < 0$. Значения момента M_k и сколь-

жения $s_{к, АД}$, соответствующие экстремальным точкам, получили название критических.

Если разделить выражение (8.8) на (8.9) и выполнить несложные преобразования, то можно получить другую, более компактную и удобную форму записи для построения механической характеристики:

$$M = 2M_{к}(1 + as_{к}) / (s_{к}/s + s/s_{к} + 2as_{к}), \quad (8.11)$$

где $a = R_1/R_2'$.

Характерные точки механической характеристики следующие:

- $s = 0, \omega = \omega_0, M = 0$ — точка идеального холостого хода;
- $s = 1, \omega = 0, M = M_{к,з} = M_{п}$ — точка короткого замыкания;
- $s = s_{к,А}, M = M_{к,А}; s = -s_{к,Г}, M = -M_{к,Г}$ — критические точки соответственно в двигательном и генераторном режимах;
- $s \rightarrow \pm\infty, \omega \rightarrow \mp\infty, M \rightarrow 0$ — асимптота механической характеристики, которой является ось скорости.

На рис. 8.4 показана механическая характеристика АД. Отметим, что она соответствует определенному чередованию фаз питающего напряжения сети U_1 на зажимах статора АД. При изменении порядка чередования двух фаз АД будет иметь аналогичную механическую характеристику, расположенную симметрично относительно начала координат.

В некоторых случаях при построении механической характеристики используют приближенные формулы. Если пренебречь активным сопротивлением статора, т. е. считать $a = 0$, выражения (8.11), (8.9) и (8.10) примут соответственно вид

$$M = 2M_{к'} / (s/s_{к} + s_{к}/s); \quad (8.12)$$

$$M_{к} = 3U_{ф}^2 / (2\omega_0 x_{к}); \quad (8.13)$$

$$s_{к} = R_2' / x_{к}. \quad (8.14)$$

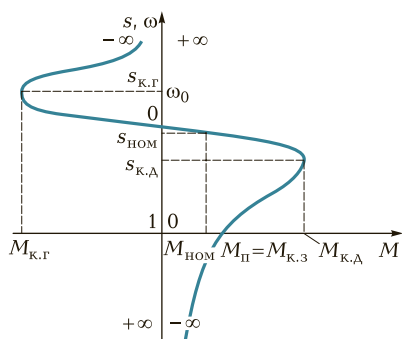


Рис. 8.4. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Если в (8.12) вместо текущих значений момента и скольжения подставить их номинальные значения $M_{\text{НОМ}}$ и $s_{\text{НОМ}}$ и обозначить кратность максимального момента $M_{\text{к}}/M_{\text{НОМ}}$ через $\lambda_{\text{м}}$, то получим формулу, связывающую критическое и номинальное скольжения,

$$s_{\text{к}} = s_{\text{НОМ}} \left(\lambda_{\text{м}} \pm \sqrt{\lambda_{\text{м}}^2 - 1} \right). \quad (8.15)$$

Эта формула может использоваться для определения $s_{\text{к}}$ по каталожным (паспортным) данным АД. Для серии 4А кратность $\lambda_{\text{м}}$, определяющая перегрузочную способность двигателей, лежит в пределах 1,8...2,6, соответственно критическое скольжение $s_{\text{к}}$ превышает номинальное $s_{\text{НОМ}}$ (при знаке «+» в (8.15)) примерно в 3...4 раза.

Дальнейшее упрощение (8.12) возможно для области малых скольжений, в которой можно пренебречь отношением $s/s_{\text{к}}$. В этом случае выражение (8.12) примет вид

$$M = 2M_{\text{к}}s/s_{\text{к}}. \quad (8.16)$$

Формула (8.16) описывает так называемый рабочий, близкий к линейному участок характеристики двигателя, на котором находится точка номинального режима с координатами $M_{\text{НОМ}}$, $\omega_{\text{НОМ}}$, $s_{\text{НОМ}}$.

АД может работать во всех возможных энергетических режимах, которые определяются значением и знаком скольжения, а именно:

- $s = 0$, $\omega = \omega_0$ — режим идеального холостого хода;
- $s = 1$, $\omega = 0$ — режим короткого замыкания;
- $0 < s < 1$, $0 < \omega < \omega_0$ — двигательный режим;
- $s < 0$, $\omega > \omega_0$ — генераторный режим при работе АД параллельно с сетью (рекуперативное торможение);
- $s > 1$, $\omega < 0$ — генераторный режим при работе АД последовательно с сетью (торможение противовключением).

Кроме того, АД может работать в генераторном режиме независимо от сети переменного тока, который называется режимом динамического торможения. В этом режиме обмотка статора АД, отключенная от сети переменного тока, подключена к источнику постоянного тока, а цепь ротора замкнута накоротко или на добавочные резисторы (см. разд. 8.8).

Полученные формулы для электромеханической и механической характеристик позволяют назвать возможные способы регулирования координат АД, которое, напомним, всегда связано с получением искусственных характеристик двигателя. Из (8.3) следует, что регулирование (ограничение) токов в роторе и статоре

в переходных режимах может быть обеспечено изменением подводимого к статору АД напряжения, а также с помощью добавочных резисторов в цепях статора и ротора.

Формула (8.8) определяет возможные способы получения искусственных механических характеристик, требуемых при регулировании момента и скорости АД, а именно: изменение уровня и частоты подводимого к двигателю напряжения; включение в цепи статора и ротора добавочных активных и реактивных резисторов; изменение числа пар полюсов магнитного поля АД. Применяются и другие способы регулирования координат, реализуемые с помощью специальных схем включения АД, — каскадные схемы, схемы электрического вала.

Задача 8.1. АД типа МТН-312-6 имеет следующие данные: $P_{\text{ном}} = 17,5$ кВт, $n_{\text{ном}} = 945$ мин⁻¹; $U_{1\text{ном}} = 380$ В; $f_1 = 50$ Гц; $I_{1\text{ном}} = 43$ А; $R_c = 0,34$ Ом; $x_1 = 0,43$ Ом; $R_p = 0,12$ Ом; $x_2 = 0,25$ Ом; $k = 2,66$; $\lambda_m = M_k/M_{\text{ном}} = 2,5$.

Рассчитать и построить естественные электромеханическую и механическую характеристики двигателя.

Определим скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 3 = 104,8 \text{ рад/с.}$$

Рассчитаем приведенные значения сопротивлений обмотки ротора и индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$x_2' = x_2 k^2 = 0,25 \cdot 7,08 = 1,8 \text{ Ом; } R_p' = R_p k^2 = 0,12 \cdot 7,08 = 0,89 \text{ Ом;}$$

$$x_k = x_1 + x_2' = 0,43 + 1,8 = 2,23 \text{ Ом.}$$

Определим характерные точки характеристики $I_2'(s)$:

$$I_{k.3} = I_{\text{пуск}} = U_{1\phi} / \sqrt{(R_c + R_p')^2 + x_k^2} = 220 / \sqrt{(0,34 + 0,89)^2 + 2,23^2} = 87,1 \text{ А;}$$

$$s_1 = -R_p' / R_c = -0,89 / 0,34 = -2,6; \quad I_{\text{max}} = U_{1\phi} / x_k = 220 / 2,23 = 99,5 \text{ А;}$$

$$I_{\infty} = U_{1\phi} / \sqrt{R_c^2 + x_k^2} = 220 / \sqrt{0,34^2 + 2,23^2} = 98,4 \text{ А.}$$

Для расчета электромеханической характеристики $I_2'(s)$ в формулу (8.3) подставим найденные значения параметров:

$$I_2' = U_{1\phi} / \sqrt{(R_c + R_p'/s)^2 + x_k^2} = 220 / \sqrt{(0,34 + 0,89/s)^2 + 2,23^2}.$$

Для расчета механической характеристики определим сначала координаты точек номинального режима и критического момента:

$$\omega_{\text{ном}} = \pi n_{\text{ном}} / 30 = 3,14 \cdot 945 / 30 = 99 \text{ рад/с;}$$

$$s_{\text{ном}} = (\omega_0 - \omega_{\text{ном}}) / \omega_0 = (104,8 - 99) / 104,8 = 0,07;$$

$$M_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \omega_{\text{НОМ}} = 17\,500 / 99 = 177 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{\text{к}} = \lambda_{\text{м}} M_{\text{НОМ}} = 2,5 \cdot 177 = 442 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{\text{к}} = R'_p / \sqrt{R_c^2 + x_k^2} = 0,89 / \sqrt{0,34^2 + 2,23^2} = 0,4; \quad a = R_c / R'_p = 0,34 / 0,89 = 0,34.$$

Подставив полученные значения в (8.11), получим расчетную формулу:

$$M = 2M_{\text{к}}(1 + as_{\text{к}}) / (s/s_{\text{к}} + s_{\text{к}}/s + 2as_{\text{к}}) = 1\,018 / (s/0,4 + 0,4/s + 0,3).$$

Задаваясь скольжением s , рассчитаем значения тока и момента:

s	-3	-2,6	-0,5	0	0,07	0,4	1	1,5
ω , рад/с.....	419,2	337	157,2	104,8	99	62,9	0	-52,4
I'_2 , А.....	99,4	99,5	83,4	0	16,6	64,7	87,1	91,8
M , Н·м.....	-120	-160	-582	0	177	442	316	234

Используя полученные данные, построим естественные электромеханическую 1 и механическую 2 характеристики (рис. 8.5).

Задача 8.2. АД с короткозамкнутым ротором типа 4А160S имеет следующие паспортные данные: $P_{\text{НОМ}} = 15 \text{ кВт}$; $n_{\text{НОМ}} = 1\,465 \text{ мин}^{-1}$; $I_{\text{НОМ}} = 29,3 \text{ А}$; $\lambda_{\text{м}} = M_{\text{к}} / M_{\text{НОМ}} = 2,3$; $\lambda_1 = I_{\text{II}} / I_{\text{НОМ}} = 7$; $p = 2$; $f_{\text{НОМ}} = 50 \text{ Гц}$; $U_{\text{IНОМ}} = 380 \text{ В}$. Рассчитать естественную механическую характеристику АД.

Определим номинальную угловую скорость:

$$\omega_{\text{НОМ}} = 2\pi n_{\text{НОМ}} / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1465 / 60 = 153 \text{ рад/с}.$$

Определим скорость идеального холостого хода, номинальные момент и скольжение:

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 2 = 157 \text{ рад/с};$$

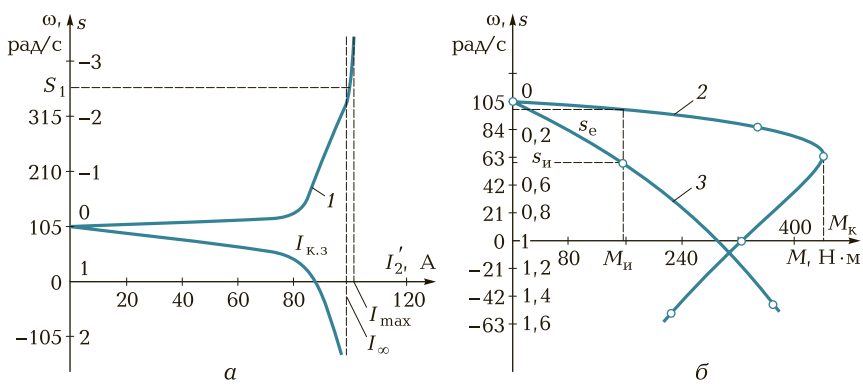


Рис. 8.5. Расчетные электромеханическая (а) и механические (б) характеристики двигателя:

1 — электромеханическая; 2 — естественная механическая; 3 — реостатная механическая

$$M_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}}/\omega_{\text{НОМ}} = 15\,000/153 = 98 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{\text{НОМ}} = (\omega_0 - \omega_{\text{НОМ}})/\omega_0 = (157 - 153)/157 = 0,025.$$

Полученных данных достаточно для приближенного построения рабочего участка механической характеристики АД по двум точкам — номинальной $(\omega_{\text{НОМ}}, M_{\text{НОМ}})$ и холостого хода $(\omega_0, 0)$. Для получения полной механической характеристики продолжим расчет.

Определим критический момент АД:

$$M_{\text{к}} = \lambda_{\text{м}} M_{\text{НОМ}} = 2,3 \cdot 98 = 225 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

и по формуле (8.15) критическое скольжение АД (приняв знак «+»):

$$s_{\text{к}} = s_{\text{НОМ}} \left(\lambda_{\text{м}} + \sqrt{\lambda_{\text{м}}^2 - 1} \right) = 0,025 \left(2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1} \right) = 0,11.$$

Подставив найденные значения в формулу (8.12), получим

$$M = 2M_{\text{к}} / (s/s_{\text{к}} + s_{\text{к}}/s) = 2 \cdot 225(s/0,11 + 0,11/s).$$

Задаваясь рядом значений s от 1 до 0, определим соответствующие значения момента:

s	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,11	0
ω , рад/с.....	0	31,4	62,8	94,2	126	151	157
M , Н·м.....	48,9	60,7	79,8	115	190	225	0

По полученным данным построим искомые зависимости $M(s)$ и $M(\omega)$ (кривая 2 на рис. 8.5).

8.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ РЕЗИСТОРОВ

Данный способ регулирования координат, называемый часто реостатным, осуществляется введением добавочных активных резисторов в статорные или роторные цепи АД (см. рис. 8.1). Он привлекателен простотой своей реализации, но имеет в то же время невысокие показатели качества регулирования и экономичности.

Включение добавочных резисторов $R_{1\Delta}$ в цепь статора применяется главным образом для регулирования (ограничения) в переходных процессах тока и момента АД с короткозамкнутым ротором. Как следует из формулы (8.3), включение резистора в цепь статора ведет при данной скорости (скольжении) к снижению токов статора и ротора. Другими словами, все искусственные элек-

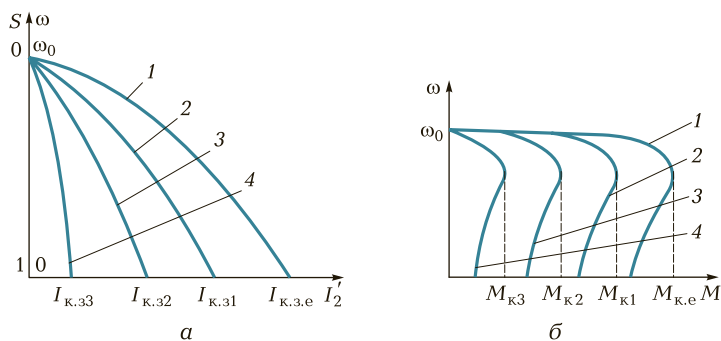


Рис. 8.6. Электромеханические (а) и механические (б) характеристики (1...4) двигателя при включении добавочного резистора в цепь статора

тормеханические характеристики располагаются в первом квадранте ниже и левее естественной. С учетом того что скорость идеального холостого хода ω_0 при включении $R_{1\Delta}$ не изменяется, получаемые искусственные электромеханические характеристики можно представить семейством кривых 2...4, которые расположены ниже естественной характеристики 1, построенной при $R_{1\Delta} = 0$, причем большему значению $R_{1\Delta}$ соответствует больший наклон искусственных характеристик (рис. 8.6, а). Практическая ценность этих характеристик состоит в обеспечении возможности ограничения токов АД при пуске.

Для получения искусственных механических характеристик проанализируем влияние $R_{1\Delta}$ на координаты их характерных точек.

Скорость холостого хода $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ не изменяется при $R_{1\Delta} = \text{var}$, т. е. все искусственные характеристики проходят через эту точку на оси скорости (скольжения).

Координаты точки экстремума M и s_k изменяются при варьировании $R_{1\Delta}$, а именно: в соответствии с (8.9) и (8.10) при увеличении $R_{1\Delta}$ критический момент и критическое скольжение уменьшаются. Уменьшается и пусковой момент, который определяется формулой (8.8) при $s = 1$. Проведенный анализ позволяет представить искусственные механические характеристики 2...4 АД при $R_{1\Delta} = \text{var}$ в виде, показанном на рис. 8.6, б. Такие характеристики могут использоваться при необходимости для снижения в переходных процессах момента АД, в том числе и пускового. В то же время эти искусственные характеристики мало пригодны для регулирования скорости АД, так как они обеспечивают небольшой диапазон ее

изменения; по мере увеличения $R_{1\Delta}$ жесткость характеристик и перегрузочная способность АД, характеризуемая критическим моментом, снижаются; способ имеет и низкую экономичность.

В силу этих недостатков регулирование скорости АД с помощью активных резисторов в цепи его статора применяется редко. Этот способ обычно используется для ограничения токов и моментов АД с короткозамкнутым ротором в различных переходных процессах — при пуске, реверсе и торможении. Например, такая схема применяется в ЭП лифтов с двухскоростными АД. В таких ЭП при переходе с высокой скорости на пониженную в цепь низкоскоростной обмотки статора вводятся добавочные резисторы, которые обеспечивают ограничение тока и момента АД. Отметим, что в некоторых ЭП ограничение тока и момента осуществляется включением $R_{1\Delta}$ в одну фазу (так называемые несимметричные схемы), что позволяет получить эффект уменьшения тока и момента при меньшем числе резисторов.

Включение добавочных резисторов $R_{2\Delta}$ в цепь ротора (см. рис. 8.1, а) применяется как в целях регулирования тока и момента АД с фазным ротором, так и для регулирования его скорости.

Искусственные электромеханические характеристики при $R_{2\Delta} = \text{вар}$ имеют вид, показанный на рис. 8.6, а, и могут использоваться для регулирования (ограничения) пускового тока.

Для построения в этом случае искусственных механических характеристик проводят анализ их характерных точек. В соответствии с (8.9) скорость идеального холостого хода АД и его максимальный (критический) момент остаются неизменными при регулировании $R_{2\Delta}$, а критическое скольжение, как это следует из (8.10), изменяется пропорционально сопротивлению этого резистора.

Выполненный анализ позволяет построить естественную 1 ($R_{2\Delta} = 0$) и искусственные 2 и 3 ($R_{2\Delta 2} > R_{2\Delta 1}$) характеристики (рис. 8.7) и сделать вывод о том, что за счет изменения $R_{2\Delta}$ можно повышать пусковой момент АД вплоть до критического значения M_k при одновременном снижении пускового тока. Это позволяет сохранить перегрузочную способность двигателя, что весьма важно при регулировании его скорости.

Рассматриваемый способ имеет следующие показатели: небольшой диапазон регулирования скорости из-за снижения жесткости характеристик и роста потерь энергии по мере его увеличения; плавность регулирования скорости, изменяющаяся только вниз от основной, определяется плавностью изменения добавочного резистора $R_{2\Delta}$; небольшие затраты, связанные с созданием

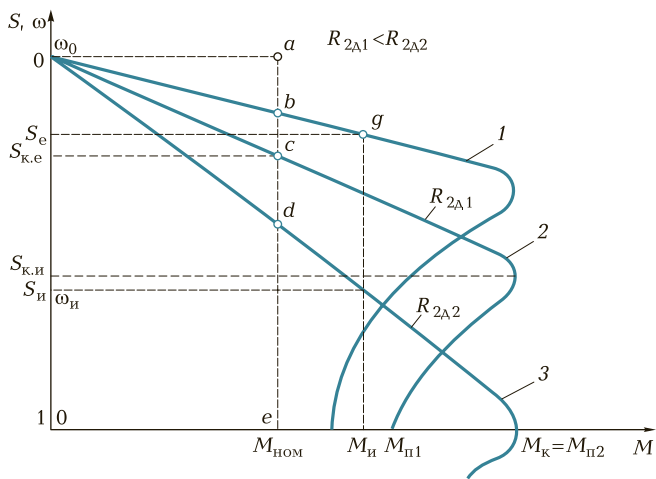


Рис. 8.7. Механические характеристики асинхронного двигателя при включении дополнительных резисторов в цепь ротора:

1 — естественная; 2 — реостатная при $R_{2\Delta 1}$; 3 — реостатная при $R_{2\Delta 2}$

данной системы ЭП, так как для регулирования обычно используются простые и дешевые ящики металлических резисторов. В то же время эксплуатационные затраты оказываются значительными, поскольку велики потери энергии в АД.

С увеличением скольжения s (8.5) возрастают потери в роторной цепи, т. е. реализация большого диапазона регулирования скорости приводит к значительным потерям энергии и снижению КПД ЭП, следовательно данный способ применяется при небольшом требуемом диапазоне регулирования или кратковременной работе двигателя на пониженных скоростях, например в ЭП подъемно-транспортных машин и механизмов.

8.3. РАСЧЕТ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Задача по расчету резисторов в цепях статора и ротора обычно формулируется следующим образом: известны паспортные данные двигателя; требуется рассчитать сопротивление добавочных резисторов в цепях ротора или статора, при включении которых искусственные характеристики пройдут соответственно через точки с координатами $(\omega_{и}, I_{и})$ или $(\omega_{и}, M_{и})$. Расположение характеристик обычно задается по соображениям регулирования скоро-

сти или получения требуемых (допустимых) значений пусковых тока или момента АД.

Расчет резисторов в цепи статора. Рассмотрим задачу, когда включение добавочного резистора во все три фазы статора (симметричная схема) должно обеспечить заданную кратность пускового тока $\alpha = I_{п.и}/I_{п.е}$ или момента $\mu = M_{п.и}/M_{п.е}$, где $I_{п.и}$, $I_{п.е}$ и $M_{п.и}$, $M_{п.е}$ — соответственно пусковые токи и моменты АД при включении добавочного резистора и без него.

Введем понятия полного комплексного сопротивления короткого замыкания z_k , соответствующего моменту пуска АД:

$$z_k = U_{1\phi} / (\sqrt{3} I_{п.е}), \quad (8.17)$$

а также активного r_k и реактивного x_k сопротивлений короткого замыкания, определяемых по формулам:

$$r_k = z_k \cos \varphi_{п}; \quad (8.18)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}, \quad (8.19)$$

где $\cos \varphi_{п}$ — коэффициент мощности АД в момент его пуска.

Тогда для получения заданных кратностей пусковых тока α или момента μ требуемое сопротивление добавочного резистора определим по формулам:

$$R_{1\Delta} = \sqrt{(z_k/\alpha)^2 - x_k^2} - r_k; \quad (8.20)$$

$$R_{1\Delta} = \sqrt{(z_k/\mu)^2 - x_k^2} - r_k. \quad (8.21)$$

Основная трудность при использовании формул (8.18)...(8.21) состоит в определении $\cos \varphi_{п} = \cos \varphi_{к.з}$, значение которого обычно не приводится в справочниках и каталогах. На рис. 8.8 показаны

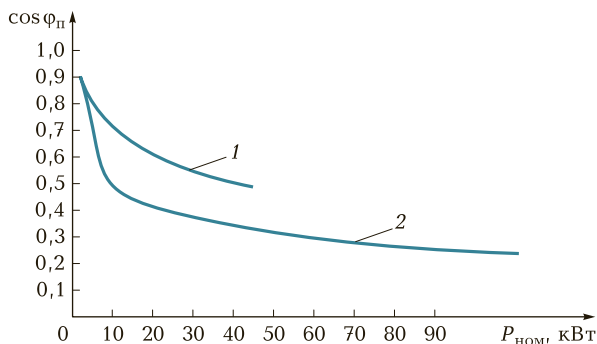


Рис. 8.8. Зависимости (1 и 2) коэффициента мощности асинхронных двигателей при пуске от номинальной мощности

усредненные зависимости коэффициента мощности асинхронных двигателей от их номинальной мощности в режиме короткого замыкания (пуска), рассчитанные по паспортным данным двигателей серий 4А (кривая 2), и МТК (кривая 1) для различных скоростей вращения. Приблизительно для серии двигателей 4А с короткозамкнутым ротором можно принять $\cos \varphi_n = 0,3 \dots 0,5$, а для АД серий МТФ и МТН $\cos \varphi_n = 0,6 \dots 0,7$.

Расчет резисторов в цепи ротора. Обычно требуется определить сопротивление дополнительного резистора $R_{2\Delta}$, при включении которого АД будет иметь заданную искусственную характеристику или же она будет проходить через заданную точку с координатами (ω_n, M_n) . При этом предполагается, что естественная механическая характеристика АД известна (рассчитана или снята экспериментально), а требуемая искусственная характеристика задана по условиям пуска или регулирования скорости.

Расчет сопротивления добавочного резистора $R_{2\Delta}$ может быть выполнен несколькими способами в зависимости от формы задания требуемой искусственной механической характеристики.

Если искусственная характеристика задана полностью и определена точка критического момента (например, характеристика 2 на рис. 8.7), то в этом случае расчет основывается на формуле (8.10), с помощью которой находится отношение критических скольжений АД на естественной 1 и искусственной 2 характеристиках:

$$s_{к.е}/s_{к.и} = R'_p / (R'_p + R'_{2\Delta 1}) = R_p / (R_p + R_{2\Delta 1}), \quad (8.22)$$

где R_p — сопротивление фазы обмотки ротора АД. Из (8.22) определим искомое значение

$$R_{2\Delta 1} = R_p (s_{к.и} / s_{к.е} - 1). \quad (8.23)$$

Формула (8.23) справедлива не только для критического момента $M_{к1}$, но и для любого фиксированного момента M_n . Таким образом, если задана некоторая точка f искусственной характеристики 3 (см. рис. 8.7) с координатами M_n, s_n , то искомое сопротивление резистора можно найти по формуле

$$R_{2\Delta 2} = R_p (s_n / s_e - 1), \quad (8.24)$$

где s_e — скольжение АД на естественной характеристике 1, соответствующее моменту M_n .

Отметим, что значение сопротивления обмотки ротора можно найти приблизительно по следующей формуле с использованием паспортных данных АД:

$$R_p = E_{2к} s_{\text{НОМ}} / (\sqrt{3} I_{2\text{НОМ}}). \quad (8.25)$$

Если искусственная характеристика задана своей рабочей частью, то для расчета резисторов можно использовать метод отрезков, который подробно рассматривался в гл. 7 применительно к ДПТНВ. На рис. 8.7 выполнено такое построение, для чего проведена вертикальная линия, соответствующая номинальному моменту $M_{\text{НОМ}}$, и отмечены характерные точки a, b, c, d, e . Тогда сопротивление искомого резистора для получения характеристики 2

$$R_{2\Delta 1} = R_{\text{НОМ}} bc/ae, \quad (8.26)$$

где $R_{\text{НОМ}} = E_{2к} / (\sqrt{3} I_{2\text{НОМ}})$ — номинальное сопротивление АД; $E_{2к}$ — ЭДС ротора при $s = 1$; $I_{2\text{НОМ}}$ — номинальный ток ротора.

С помощью метода отрезков и рис. 8.7 при необходимости по естественной характеристике 1 можно найти и сопротивление фазы обмотки ротора

$$R_p = R_{2\text{НОМ}} ab/ae. \quad (8.27)$$

Типовой задачей для ЭП с АД с фазным ротором является расчет резисторов в цепи ротора, обеспечивающих заданную пусковую диаграмму двигателя. Напомним, что пусковая диаграмма представляет собой совокупность нескольких искусственных механических характеристик АД, которые используются при его пуске. Пусковая диаграмма АД обычно строится по аналогии с ДПТНВ (см. подразд. 7.5, рис. 7.7) в предположении, что рабочий участок механических характеристик АД близок к линейному. При построении пусковой диаграммы АД момент M_1 обычно принимается не более $(0,8 \dots 0,9)M_k$, а момент M_2 должен составлять $(1,1 \dots 1,2)M_c$. Число характеристик (ступеней) пусковой диаграммы m и значения моментов M_1 и M_2 связаны между собой следующим соотношением:

$$m = \lg(1/(s_{\text{НОМ}} M_1)) / \lg(M_1/M_2). \quad (8.28)$$

Расчет пусковых резисторов, обеспечивающих требуемую пусковую диаграмму, производится с помощью формул (8.24) или (8.26).

Задача 8.3. Для АД типа 4А160S (см. задачу 8.2) рассчитать сопротивление добавочного резистора $R_{1\Delta}$, включение которого в три фазы двигателя уменьшит пусковой ток в два раза ($\alpha = 0,5$).

Определим пусковой ток АД при отсутствии резисторов в цепи статора:

$$I_{1п.е} = \lambda_1 I_{1\text{НОМ}} = 7 \cdot 29,3 = 205 \text{ А.}$$

Определим по формуле (8.17) полное сопротивление короткого замыкания:

$$z_k = U_{\text{ном}} / (\sqrt{3} I_{\text{ном}}) = 380 / (1,73 \cdot 205) = 1,08 \text{ Ом.}$$

Принимая по рис. 8.8 $\cos \varphi_{\text{п}} = 0,4$, определим по (8.18) и (8.19)

$$r_k = z_k \cos \varphi_{\text{п}} = 1,08 \cdot 0,4 = 0,43 \text{ Ом;}$$

$$x_k = \sqrt{(z_k^2 - r_k^2)} = \sqrt{1,08^2 - 0,43^2} = 1 \text{ Ом.}$$

Теперь найдем по (8.20) искомое сопротивление:

$$R_{1\Delta} = \sqrt{(z_k/\alpha)^2 - x_k^2} - r_k = \sqrt{(1,08/0,5)^2 - 1^2} - 0,43 = 1,5 \text{ Ом.}$$

Задача 8.4. Для АД типа МТН-312-6 (см. задачу 8.1) рассчитать добавочное сопротивление $R_{2\Delta}$, при включении которого в цепь ротора механическая характеристика пройдет через точку с координатами $\omega = 0,6\omega_{\text{ном}}$, $M_{\text{и}} = 0,9M_{\text{ном}}$. Рассчитать и построить эту искусственную характеристику.

Рассчитаем координаты заданной точки, используя координаты номинальной точки (см. задачу 8.1):

$$\omega_{\text{и}} = 0,6\omega_{\text{ном}} = 0,6 \cdot 99 = 59,4 \text{ рад/с;}$$

$$s_{\text{и}} = (\omega_0 - \omega_{\text{и}}) / \omega_0 = (104,8 - 59,4) / 104,8 = 0,43;$$

$$M_{\text{и}} = 0,9M_{\text{ном}} = 0,9 \cdot 177 = 159 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

и нанесем ее на плоскость механических характеристик (см. рис. 8.5).

Для момента $M_{\text{и}} = 159 \text{ Н} \cdot \text{м}$ определим скольжение s_e при работе АД на естественной характеристике 2, которое оказывается равным 0,06.

По формуле (8.24) определим требуемое добавочное сопротивление:

$$R'_{2\Delta} = R'_p (s_{\text{и}} / s_e - 1) = 0,89(0,43/0,06 - 1) = 5,5 \text{ Ом.}$$

Критическое скольжение при включении добавочного сопротивления и работе АД на искусственной характеристике 3:

$$s_{\text{к.и}} = (R'_{2\Delta} + R'_p) / \sqrt{R_c^2 + x_k^2} = (0,89 + 5,5) / \sqrt{0,34^2 + 2,23^2} = 2,83,$$

а критический момент в соответствии с (8.9) на искусственной характеристике не изменится: $M_{\text{к}} = 442 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Подставляя $s_{\text{к.и}}$, $M_{\text{к}}$ и новое значение $a = R_1 / R'_2 = 0,34 / 6,39 = 0,05$ в (8.11), получим следующую расчетную формулу для механической характеристики:

$$M = 2 \cdot 442 (1 + 0,05 \cdot 2,83) / (s/2,83 + 2,83/s + 2 \cdot 0,05 \cdot 2,83).$$

Задаваясь рядом значений скольжения s , определим скорость и момент АД:

s	0	0,43	0,6	0,8	1	2,83
ω , рад/с.....	104,8	59,4	41,9	21	0	-192
M , Н · м.....	0	159	194	246	291	442

Задача 8.5. Для АД типа 4А160S (см. задачу 8.2) рассчитать сопротивление резистора $R_{2\Delta}$, включение которого в цепь статора обеспечивает снижение пускового момента на 20% ($\mu = 0,8$).

Задача 8.6. Для АД типа МТН-312-6 (см. задачу 8.1) рассчитать сопротивление $R_{2\Delta}$, включение которого в цепь ротора позволит получить пусковой момент двигателя, равный критическому.

Задача 8.7. Для АД типа МТН-312-6 (см. задачу 8.1) построить пусковую диаграмму и рассчитать сопротивление пусковых резисторов в цепи ротора, обеспечивающих пуск АД в две ступени ($m = 2$) при $M_c = M_{ном}$. Рабочий участок механических характеристик АД принять линейным.

8.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ИЗМЕНЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

Изменение напряжения, подводимого к статору АД, позволяет осуществлять в статических и динамических режимах регулирование его координат с хорошими показателями и с помощью относительно простых схем управления (рис. 8.9), а также обеспечить экономичные режимы работы двигателя.

Для регулирования координат АД между сетью переменного тока со стандартным напряжением $U_{1ном}$ и статором двигателя 2 включен регулятор напряжения 1, выходное напряжение которого $U_{1рег}$ изменяется с помощью маломощного внешнего сигнала управления U_y в пределах от значения сетевого напряжения $U_{1ном}$ и практически до нуля. При этом частота напряжения на двигателе не изменяется и равна стандартной (50 Гц).

Регулирование напряжения на статоре не приводит к изменению скорости холостого хода $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ и не влияет на критическое скольжение $s_{кр}$, но существенно изменяет критический момент $M_{кр}$. Как следует из (8.9), уменьшение $M_{кр}$ происходит пропор-

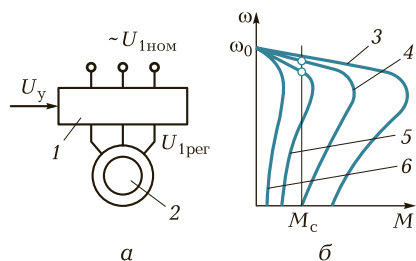


Рис. 8.9. Схема включения (а) и механические характеристики (б) асинхронного двигателя при регулировании напряжения на статоре:

1 — регулятор напряжения; 2 — двигатель; 3 — естественная механическая характеристика; 4...6 — искусственные характеристики при регулировании напряжения

ционально квадрату снижения напряжения. В результате при $U_{\text{пер}} = \text{var}$ искусственные характеристики 3...6, построенные соответственно при напряжениях (1; 0,8; 0,6 и 0,4) $U_{\text{ном}}$ оказываются малопригодными для регулирования скорости, так как по мере уменьшения напряжения резко снижаются критический момент АД и тем самым его перегрузочная способность, а диапазон регулирования скорости очень мал. Разомкнутая схема, показанная на рис. 8.9, используется лишь для воздействия в переходных процессах на момент АД, что может требоваться, например, для обеспечения заданного ускорения движения ЭП или регулирования натяжения на исполнительном органе рабочей машины.

Изменение напряжения позволяет также в соответствии с (8.3) осуществлять регулирование (ограничение) в переходных режимах тока АД.

Электромеханические характеристики при этом имеют вид кривых, показанных на рис. 8.6, а.

Для регулирования напряжения на статоре АД могут использоваться различные электротехнические устройства — автотрансформаторы, магнитные усилители, а также тиристорные регуляторы напряжения (ТРН), получившие в настоящее время наибольшее распространение из-за высокого КПД, простоты обслуживания, легкости автоматизации работы ЭП и большого их ассортимента, выпускаемого промышленностью. ТРН позволяют реализовывать самые разнообразные функции по управлению и оптимизации режимов работы ЭП с АД; на их основе строятся устройства, позволяющие формировать нужным образом динамические характеристики ЭП, они позволяют также реализовывать режимы работы АД с наилучшими энергетическими показателями при малых его нагрузках.

Рассмотрим принцип действия ТРН и основанную на его использовании распространенную систему ЭП «тиристорный регулятор напряжения — асинхронный двигатель» (ТРН — АД).

На рис. 8.10, а показана схема регулирования напряжения на однофазной нагрузке переменного тока $z_{\text{н}}$. Силовая часть однофазного ТРН образована двумя тиристорами $VS1$ и $VS2$, включенными по так называемой встречно-параллельной схеме, которая обеспечивает протекание тока в нагрузке в оба полупериода напряжения сети U_1 . Тиристоры получают импульсы управления U_{α} от СИФУ, которая обеспечивает их сдвиг на угол управления α в функции внешнего сигнала управления U_{γ} .

Если на тиристоры $VS1$ и $VS2$ не подаются импульсы управления от СИФУ, то они закрыты и напряжение на нагрузке $U_{\text{пер}}$ рав-

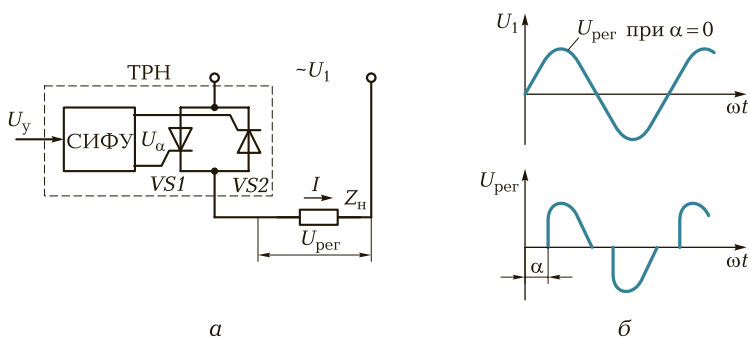


Рис. 8.10. Схема (а) и графики напряжения (б) однофазного тиристорного регулятора напряжения

но нулю. При подаче на тиристоры импульсов управления с углом управления $\alpha = 0$ они будут полностью открыты и к нагрузке будет приложено все напряжение сети $U_1 = U_{\text{пер}}$ (рис. 8.10, б). Если осуществлять подачу импульсов управления на тиристоры с некоторой задержкой относительно предельного режима (угол управления $\alpha \neq 0$), то к нагрузке будет прикладываться часть напряжения сети. Изменяя угол управления α от нуля до π , можно регулировать напряжение на нагрузке от полного напряжения сети до нуля.

На основе однофазной схемы, показанной на рис. 8.10, а, работают трехфазные схемы для регулирования напряжения на статоре АД, состоящие из шести тиристоров $VS1 \dots VS6$ (рис. 8.11). Отметим, что в таких схемах вместо пары встречно-параллельно включенных тиристоров может применяться полупроводниковый прибор симистор, обеспечивающий протекание тока в фазе двигателя в обоих направлениях. Его применение сокращает число электронных приборов вдвое и упрощает схему СИФУ.

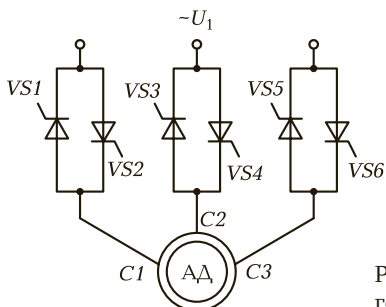
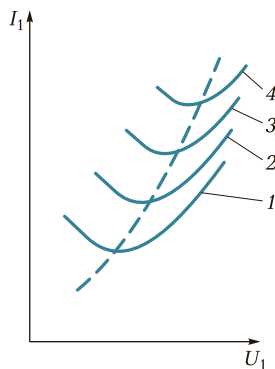


Рис. 8.11. Схема силовой части трехфазного тиристорного регулятора напряжения

Рис. 8.12. U-образные характеристики (1...4) асинхронного двигателя



Отметим, что напряжение на нагрузке является несинусоидальным и его можно представить совокупностью нескольких синусоидальных напряжений — гармоник, каждая из которых изменяется с определенной частотой. Частота изменения первой из них (основной гармоники) равна частоте питающего напряжения, а частоты изменения других гармоник больше, чем первой. Обычно первая гармоника имеет наибольшую амплитуду и по ней ведутся все основные расчеты.

Функциональные возможности ТРИ по управлению АД этим далеко не исчерпываются. С их помощью можно обеспечивать принудительное электрическое торможение АД, формирование требуемых динамических характеристик ЭП в переходных режимах, обеспечение экономичных режимов АД при его работе с переменной нагрузкой.

Как известно из теории электрических машин, при небольших нагрузках КПД асинхронного двигателя и коэффициент мощности снижаются, что ухудшает экономические показатели его работы.

Регулирование напряжения на статоре АД в сторону его уменьшения позволяет повысить экономичность его работы при небольших механических нагрузках и холостом ходе ЭП.

Рассмотрим принципы построения ЭП, в котором минимизируется потребляемый АД ток и тем самым потери электроэнергии в нем. Для этого обратимся к зависимостям тока статора I_1 от напряжения U_1 (рис. 8.12, а) при разных моментах нагрузки M_c . Как видно из графиков 1...4, построенных соответственно при $M_{c1} < M_{c2} < M_{c3} < M_{c4}$, для каждого момента имеется такое напряжение, при котором потребляемый АД ток из сети минимален. Штриховая линия, проведенная через точки минимумов тока для каждой нагрузки, определяет закон регулирования напряжения в функции тока, при реализации которого при любом M_c из сети потребляется минимальный ток.

Кроме минимизации потерь электроэнергии простыми средствами в такой схеме осуществляется повышение КПД и коэффициента мощности асинхронного ЭП.

8.5. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Данный способ, называемый иногда частотным, широко используется для качественного регулирования в первую очередь скорости АД и широко применяется в настоящее время. Принцип его заключается том, что изменяя частоту f_1 питающего АД напряжения, можно в соответствии с выражением $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$ изменять его скорость ω_0 , получая различные искусственные характеристики. Этот способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, а получаемые при этом характеристики обладают высокой жесткостью. Частотный способ к тому же отличается и еще одним весьма важным свойством: регулирование скорости АД в этом случае не сопровождается увеличением его скольжения, поэтому потери мощности, определяемые по (8.5), оказываются небольшими.

Для лучшего использования и получения высоких энергетических показателей работы АД (коэффициентов мощности, полезного действия и перегрузочной способности) одновременно с частотой необходимо изменять и подводимое к нему напряжение. Рациональный закон изменения напряжения при этом зависит от характера момента нагрузки M_c . Так, при постоянном моменте нагрузки $M_c = \text{const}$ напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально его частоте

$$U_1 / f_1 = \text{const}. \quad (8.29)$$

Для вентиляторного характера момента нагрузки соотношение M_c будет иметь вид

$$U_1 / f_1^2 = \text{const}, \quad (8.30)$$

а при моменте нагрузки, обратном пропорциональном скорости,

$$U_1 / \sqrt{f_1} = \text{const}. \quad (8.31)$$

Таким образом, при реализации частотного способа регулирования скорости АД используется преобразователь частоты, который позволяет также регулировать и напряжение на его статоре.

Отметим, что на практике используются и более сложные по сравнению с выражениями (8.29)...(8.31) законы частотного управления, в частности учитывающие наличие активного сопротивления статора.

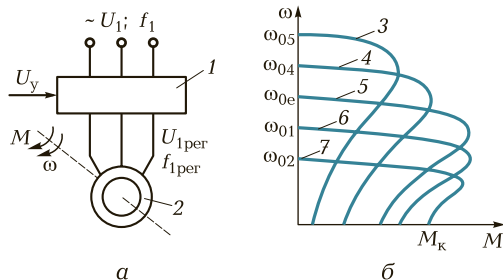


Рис. 8.13. Схема включения (а) и механические характеристики (б) при регулировании частоты напряжения на статоре:

1 — преобразователь частоты; 2 — двигатель; 3... 7 — искусственные характеристики

Схема включения АД и его характеристики при изменении частоты (рис. 8.13). Необходимым элементом ЭП является преобразователь частоты и напряжения 1 (в дальнейшем используется обозначение ПЧ), на вход которого подается стандартное напряжение сети U_1 (220, 380 В и т. д.) промышленной частоты $f_1 = 50$ Гц, а с выхода снимается переменное напряжение $U_{1\text{рег}}$ регулируемой частоты $f_{1\text{рег}}$ (рис. 8.13, а). Соотношения U_1/f_1 определяются формулами (8.29)...(8.31). Регулирование выходной частоты и напряжения осуществляется с помощью управляющего сигнала U_y , который задает требуемое значение скорости двигателя 2.

Анализ механических характеристик двигателя при его управлении по наиболее распространенному закону $U_1/f_1 = \text{const}$ показывает, что скорость идеального холостого хода двигателя изменяется пропорционально частоте напряжения, а критический момент M_k остается неизменным, что следует из упрощенного выражения (8.13). Действительно, так как $\omega_0 \approx f_1$ и $x_k \approx f_1$, то критический момент $M_k \approx U_1^2 f_1^2 \approx U_1/f_1 = \text{const}$.

Механические характеристики (рис. 8.13, б) при частотном регулировании подразделяются на характеристики, соответствующие частотам ниже номинальной (сетевой) $f_{1\text{ном}}$ и выше ее.

Область частот $f_1 < f_{1\text{ном}}$. В этой области для частот $f_{13} = f_{1\text{ном}} > f_{14} > f_{15}$ (характеристики 5... 7) выполняется соотношение $U_1/f_1 = \text{const}$, так как напряжение, подводимое к АД, регулируется от номинального (сетевого) в сторону уменьшения. Поэтому $M_k = \text{const}$ и АД имеет постоянную перегрузочную способность. Отметим, что из-за влияния сопротивления R_1 , которое не учитывалось при выводе формулы (8.13), момент M_k в области малых

скоростей АД несколько снижается, поэтому для поддержания $M_k = \text{const}$ напряжение при малой частоте должно уменьшаться не пропорционально ей, а несколько в меньшей степени.

Область частот $f_1 > f_{\text{ном}}$. По условиям нормальной работы АД нельзя повышать напряжение сверх номинального (паспортного). Поэтому регулирование скорости в этой области ведется при $U_1 = U_{\text{ном}} = \text{const}$ (характеристики 3 и 4 при частотах f_{11} и f_{12}), т. е. критический момент M_k в соответствии с (8.13) будет уменьшаться при увеличении частоты ($f_{11} > f_{12} > f_{\text{ном}}$).

Принцип действия ПЧ. Различные ПЧ, которые нашли применение в частотных асинхронных ЭП, можно подразделить на две группы, отличающиеся используемыми техническими средствами и структурой.

Первую группу составляют так называемые **электромашины вращающиеся ПЧ**, в которых для получения переменной частоты используются обычные или специальные электрические машины.

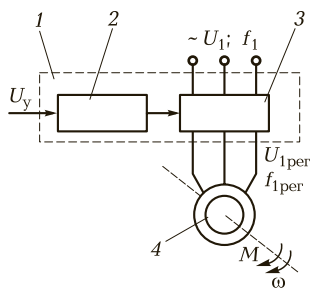
В настоящее время наибольшее распространение в ЭП получили **статические ПЧ**, названные так потому, что в них используются не имеющие движущихся частей элементы и устройства, такие как полупроводниковые приборы, реакторы, конденсаторы и др. Развитие статических ПЧ особенно ускорилось в связи с массовым производством тиристоров и силовых транзисторов. Использование статических ПЧ позволило повысить технико-экономические показатели регулируемого частотного ЭП: увеличить его КПД и быстродействие, устранить шум и упростить обслуживание.

Статические ПЧ могут быть без звена постоянного тока с непосредственной связью питающей сети и нагрузки и с промежуточным звеном постоянного тока. Рассмотрим схемы и принцип действия каждого вида ПЧ.

Упрощенная функциональная схема **ПЧ без звена постоянного тока** (позиция 1 на рис. 8.14) включает в себя силовую часть 3, с которой связан асинхронный двигатель 4, и блок управления 2. С помощью этой схемы осуществляется преобразование электрической энергии переменного тока стандартных напряжения U_1 и частоты f_1 в энергию переменного тока с регулируемым напряжением $U_{\text{пер}}$ и частотой $f_{\text{пер}}$. Силовая часть ПЧ выполняется на базе полупроводниковых приборов (обычно тиристоров), управляемых сигналами с блока 2, и в некоторых случаях содержит согласующие трансформаторы. Такие ПЧ называются также ПЧ с непосредственной связью (НПЧ), так как напряжение $U_{\text{пер}}$ на статоре АД формируется непосредственно из напряжения сети U_1 .

Рис. 8.14. Схема ЭП с преобразователем частоты с непосредственной связью:

1 — звено постоянного тока; 2 — блок управления; 3 — силовая часть; 4 — АД



ПЧ без звена постоянного тока с непосредственной связью питающей сети и нагрузки может обеспечивать регулирование частоты на статоре АД только в сторону ее уменьшения по сравнению с сетевой.

Схема ПЧ со звеном постоянного тока (рис. 8.15) состоит из двух основных блоков: управляемого или неуправляемого выпрямителя 2 и управляемого инвертора 3 с блоками управления 1 и 5. Напряжение сети U_1 стандартной частоты f_1 подается на вход управляемого выпрямителя 2, преобразующего переменное напряжение U_1 в постоянное E_0 , которое можно регулировать с помощью блока управления 1. На выходе выпрямителя 2 включается электрический фильтр, на схеме не показанный.

Выпрямленное и регулируемое напряжение E_0 подается на вход инвертора 3, который преобразует его в трехфазное напряжение U_{1per} регулируемой частоты f_{1per} , поступающее на двигатель 4. Частота выходного напряжения инвертора f_{1per} регулируется блоком управления 5 в функции сигнала управления U_y .

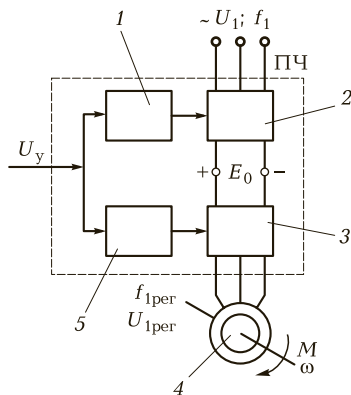


Рис. 8.15. Схема ЭП с преобразователем частоты с промежуточным звеном постоянного тока:

1 — схема управления выпрямителем; 2 — выпрямитель; 3 — инвертор; 4 — двигатель; 5 — схема управления инвертором

Важной особенностью ПЧ со звеном постоянного тока является возможность обеспечения с их помощью плавного регулирования частоты напряжения на статоре АД как ниже, так и выше сетевой, в силу чего такие ПЧ получили наибольшее распространение.

В частотно-управляемом асинхронном ЭП применяются автономные инверторы напряжения и тока. Автономные инверторы напряжения (АИН) подключаются к выпрямителю, на выходе которого устанавливается конденсатор большой емкости. АИН имеют жесткую внешнюю характеристику, т. е. с изменением тока нагрузки напряжение на их выходе практически не изменяется, поэтому при использовании АИН управляющими воздействиями для двигателя являются частота и напряжение.

Автономные инверторы тока (АИТ) питаются от управляемого выпрямителя, к выходу которого подключается реактор большой индуктивности. При использовании АИТ управляющими воздействиями для АД являются частота и ток статора.

Каждый из видов автономного инвертора имеет в частотно-управляемых асинхронных ЭП свою область применения.

Регулирование выходного напряжения ПЧ может осуществляться несколькими способами. В ПЧ с непосредственной связью оно осуществляется так же, как и в управляемых выпрямителях. Такое управление получило название фазового.

В ПЧ со звеном постоянного тока регулирование напряжения на нагрузке (статоре АД) производится двумя способами — или с помощью специального регулятора напряжения, или самим инвертором.

Первый способ, в свою очередь, может быть реализован двумя путями — за счет использования управляемого выпрямителя (фазовое управление) или неуправляемого выпрямителя и размещаемого между ним и инвертором широтно-импульсного преобразователя (ШИП) (амплитудное регулирование напряжения). К достоинствам этого способа следует отнести широкий диапазон регулирования напряжения и возможность использования для любого типа инвертора.

Второй способ связан с совмещением функций регулирования частоты и напряжения в самом инверторе. Оно реализуется с помощью соответствующих алгоритмов управления тиристорами и предусматривает использование широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Широкие перспективы применения ПЧ связаны с использованием в них силовых транзисторов (в частности, биполярных с изо-

лированным затвором в модульном исполнении) и средств микропроцессорной техники для реализации схем управления.

Частотное управление является весьма экономичным, так как обеспечивает регулирование скорости АД без больших потерь мощности в роторной цепи, ухудшающих КПД ЭП и приводящих к необходимости завышения мощности АД.

Частотное регулирование скорости может осуществляться плавно, в широком диапазоне, в обе стороны от естественной характеристики, т. е. АД может иметь скорость как больше, так и меньше номинальной. При этом регулировочные характеристики имеют высокую жесткость, а АД сохраняет большую перегрузочную способность.

Реализуемый диапазон регулирования скорости в разомкнутых системах составляет 5... 10, а в замкнутых системах (при использовании обратных связей) его значение может достигать 1 000 и более.

В силу отмеченных высоких показателей частотный способ находит в настоящее время все более широкое применение. Более того, можно назвать примеры, когда использование частотно-управляемого асинхронного ЭП является единственно возможным: привод высокоскоростных электрошпинделей, электровентен, вентиляторов высокоскоростных аэродинамических труб, различных испытательных стендов и др.

Широкому внедрению частотного ЭП во многом способствует выпуск промышленностью статических ПЧ самого разнообразного исполнения.

8.6. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСОВ

Этот способ регулирования может быть реализован только при использовании специальных АД, получивших название многоскоростных. Особенностью этих двигателей является статорная обмотка, состоящая из двух одинаковых секций (полуобмоток), используя разные схемы соединения которых можно изменять число пар полюсов p . В соответствии с формулой $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ при этом изменяется скорость вращения магнитного поля ω_0 , а значит, и скорость АД. Ротор многоскоростных АД обычно выполняется короткозамкнутым.

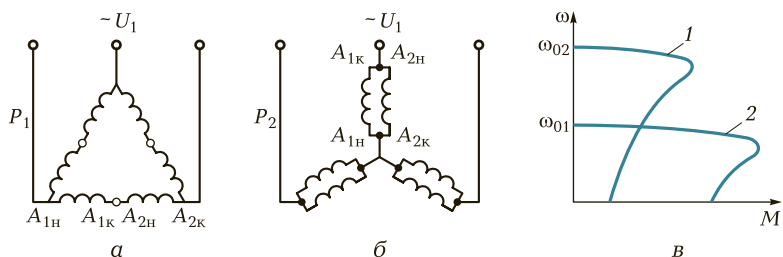


Рис. 8.16. Схемы соединения обмотки статора в треугольник (а), двойную звезду (б) и механические характеристики асинхронного двигателя при этих схемах (в):

1 — схема двойной звезды; 2 — схема треугольника

Так как число пар полюсов может принимать только дискретные значения ($p = 1, 2, 3, 4, \dots$), то и скорость АД этим способом можно регулировать лишь ступенчато.

Наиболее часто на практике применяются две схемы переключения секций статорных обмоток многоскоростных АД: с треугольника на двойную звезду и со звезды на двойную звезду. Рассмотрим схемы соединения статорных обмоток и механические характеристики АД для этих случаев.

Треугольник — двойная звезда. Для получения большего числа пар полюсов p_1 секции каждой фазы статора включены последовательно и соединены в треугольник (рис. 8.16, а), где A_{1H} и A_{2H} — начала соответственно первой и второй секций фазы А; A_{1K} и A_{2K} — их концы (обозначения для выводов фаз В и С аналогичны). Схема соединения секций на рис. 8.16, б аналогична схеме, показанной на рис. 8.16, в, и определяет уменьшение в два раза числа пар полюсов p_2 АД. Схема, в которой фазы статора образованы двумя параллельно включенными секциями, получила название двойной звезды.

Механические характеристики АД для схем соединения обмоток в треугольник 2 и двойную звезду 1 показаны на рис. 8.16, в.

Звезда — двойная звезда. В этом случае низкая скорость (большее число пар полюсов p_1) соответствует схеме соединения обмоток в одинарную звезду (рис. 8.17, а), каждую фазу которой образуют последовательно соединенные секции (обозначения см. на рис. 8.16, а). Переключение на двойную звезду осуществляется по схеме, показанной на рис. 8.16, б, при этом число пар полюсов p_2 уменьшается вдвое.

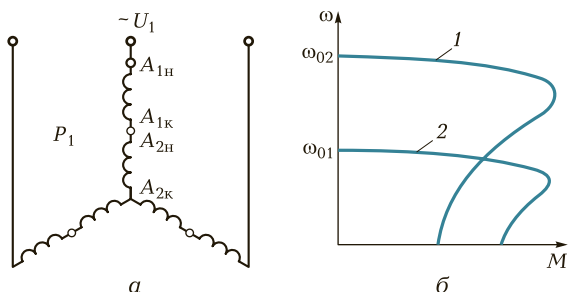


Рис. 8.17. Схема соединения обмотки статора в звезду (а) и механические характеристики асинхронного двигателя при этой схеме (б):

1 — схема двойной звезды; 2 — схема звезды

Механические характеристики при соединении обмоток в звезду 2 и двойную звезду 1 двухскоростного АД изображены на рис. 8.17, б.

Помимо рассмотренных двухскоростных применяются также трех- и четырехскоростные АД. Первые из них помимо переключаемой обмотки статора, выполняемой аналогично рассмотренной ранее, имеют также и одну непереключаемую обмотку. Четырехскоростные АД имеют две переключаемые обмотки статора с различным числом пар полюсов p_1, p_2, p_3, p_4 и позволяют получить четыре регулировочные механические характеристики.

Рассматриваемый способ регулирования скорости АД характеризуется рядом положительных показателей, что определяет широкое его применение в асинхронных ЭП, и в первую очередь это экономичность, так как процесс изменения скорости не сопровождается выделением в роторной цепи дополнительных потерь энергии, вызывающих излишний нагрев двигателя и ухудшающих его КПД.

Механические характеристики (см. рис. 8.16, в и 8.17, б) многоскоростных АД отличаются хорошей жесткостью и достаточной перегрузочной способностью.

Схему переключения «звезда — двойная звезда» целесообразно применять при постоянном моменте нагрузки M_c , а схему «треугольник — двойная звезда» — при нагрузке ЭП, имеющей характер постоянной мощности.

Недостатком рассмотренного способа является ступенчатость изменения скорости двигателя и относительно небольшой диапазон ее регулирования, обычно 6...8.

8.7. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В КАСКАДНЫХ СХЕМАХ ЕГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Регулирование скорости АД некоторыми рассмотренными ранее способами сопровождается выделением в цепи ротора потерь мощности, называемых иногда потерями скольжения, что значительно снижает экономические показатели асинхронного ЭП.

Первые схемы, в которых использовалась энергия потерь в цепи ротора, создавались путем специального соединения АД с другими электрическими машинами, поэтому эти схемы получили название каскадных. В настоящее время существуют схемы, использующие энергию скольжения АД не посредством добавочных электрических машин, а с помощью полупроводниковых приборов и трансформаторов, однако эти схемы также называют каскадными.

В общем случае каскадными называют такие схемы включения АД, которые, обеспечивая регулирование его скорости, позволяют одновременно использовать энергию потерь. По способу использования этой энергии различают схемы электромеханического и электрического машинно-вентильных каскадов.

В электромеханическом машинно-вентильном каскаде (рис. 8.18, а) обмотка ротора АД 2, приводящего в движение рабочую машину 1, подключается к трехфазному неуправляемому выпрямителю 4, собранному на полупроводниковых вентилях. К выводам выпрямителя присоединен якорь вспомогательной машины постоянного тока 3, ЭДС которой $E_{в.м}$ направлена навстречу ЭДС

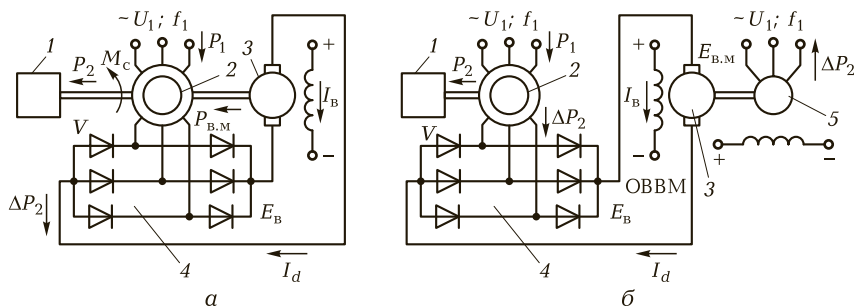


Рис. 8.18. Схемы электромеханического (а) и электрического (б) каскадов: 1 — рабочая машина; 2 — двигатель; 3 — вспомогательная машина постоянного тока; 4 — выпрямитель; 5 — синхронный генератор

выпрямителя E_B . АД 2 и машина 3 соединены одним валом. Рассмотрим баланс мощности в этой схеме.

Поступающая из сети мощность P_1 за вычетом потерь в статоре АД 2 передается на ротор. Большая часть этой мощности, называемая электромагнитной и определяемая выражением $P_{эм} = M\omega_0$, в виде полезной механической мощности $P_2 = M\omega$ передается рабочей машине 1. Оставшаяся часть, определяющая мощность потерь скольжения $\Delta P_2 = M\omega_0 s$, за вычетом потерь в цепях ротора АД 2, выпрямителя 4 и вспомогательной машины 3 с помощью последней преобразуется в механическую мощность и возвращается на вал рабочей машины 1.

Если пренебречь потерями в схеме, то можно установить, что рабочей машине 1 передается вся электромагнитная мощность $P_{эм}$. Действительно, на приводной вал рабочей машины от АД 2 поступает мощность $P_2 = M\omega$, а от вспомогательной машины 3 — мощность $P_{в.м} = \Delta P_2 = M\omega_0 s$, в результате суммарная механическая мощность на валу рабочей машины $P_{р.м} = P_2 + P_{в.м} = M\omega + M\omega_0 s = M\omega_0 = P_{эм}$.

В электрическом машинно-вентильном каскаде (рис. 8.18, б) в отличие от электромеханического вспомогательная машина 3 не имеет механической связи с АД 2, а соединена одним валом с синхронным генератором 5, подключенным к сети переменного тока, т. е. энергия потерь передается не на вал рабочей машины 1, а отдается в сеть, рабочей же машине передается только механическая мощность $P_2 = M\omega$.

Регулирование скорости в каскадных схемах осуществляется изменением ЭДС вспомогательной машины 3 в результате воздействия на ток возбуждения этой машины.

Из рассмотрения механических характеристик электромеханического каскада (рис. 8.19, а) для разных значений токов 1...4 (соответственно $I_B = (0; 0,2; 0,4; 1,0)I_{в.ном}$) видно, что максимальный момент по мере снижения скорости каскада возрастает, поскольку по мере увеличения тока возбуждения вспомогательной машины ее момент также возрастает. При этом максимальная механическая мощность каскада, определяемая произведением максимального момента на соответствующую этому моменту скорость, при разных токах возбуждения вспомогательной машины примерно одинакова. Поэтому электромеханический каскад называют каскадом постоянной мощности.

При токе возбуждения вспомогательной машины, близком к нулю, механическая характеристика электрического каскада (рис. 8.19, б) близка к естественной характеристике АД. По мере

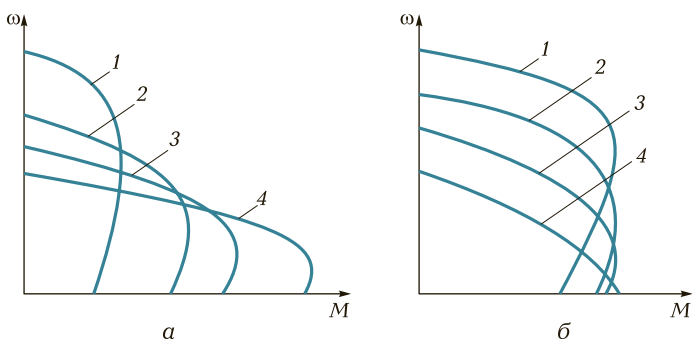


Рис. 8.19. Механические характеристики электромеханического (а) и электрического (б) каскадов:

1 — естественная; 2...4 — искусственные при регулировании тока возбуждения

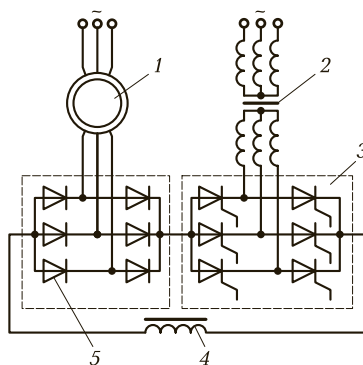
увеличения тока возбуждения искусственные характеристики 2...4 располагаются ниже естественной 1, причем номинальному току возбуждения $I_{в.ном}$ соответствует самая нижняя характеристика. Максимальный момент каскада, определяемый только АД 2 (см. рис. 8.18), сохраняется на разных характеристиках примерно постоянным. Поэтому электрический каскад называют каскадом постоянного момента.

В настоящее время в связи с широким распространением силовых тиристорных преобразователей появилась возможность заменять ими электромашинные вращающиеся преобразователи. В частности, электромашинный агрегат 3...5 (см. рис. 8.18, б) представляет собой преобразователь энергии постоянного тока, поступающей от выпрямителя 4, в энергию переменного тока, отдаваемую в сеть. Такой машинный агрегат может быть заменен на статический преобразователь частоты, состоящий из трансформатора 2 и инвертора 3 (рис. 8.20). В этой схеме к обмотке ротора АД 1 подключены неуправляемый выпрямитель 5 и инвертор 3, а также реактор 4, который служит для сглаживания пульсации выпрямленного тока. Асинхронный ЭП с такой схемой получил название асинхронного вентильного каскада.

Инвертор, как уже отмечалось, представляет собой преобразователь энергии постоянного тока в энергию переменного тока. Электродвижущую силу инвертора можно регулировать аналогично ЭДС машины постоянного тока. Поэтому механические характеристики асинхронного вентильного каскада аналогичны характеристикам вентильно-машинного электрического каскада.

Рис. 8.20. Схема асинхронного вентиляльного каскада:

1 — двигатель; 2 — трансформатор; 3 — инвертор; 4 — реактор; 5 — выпрямитель



Существует много схем асинхронных вентиляльных каскадов, аналогичных рассмотренной. Эти схемы отличаются по своей сложности, техническим возможностям регулирования скорости, энергетическим показателям и др. Однако принцип действия и назначение их аналогичны: использование энергии скольжения для совершения полезной работы и обеспечение возможности плавного регулирования скорости АД.

Несмотря на значительные капитальные затраты при реализации данного способа регулирования скорости применение каскадных схем за счет использования энергии скольжения для полезной работы оказывается экономически целесообразным для мощных асинхронных ЭП с небольшим диапазоном регулирования скорости. Это ЭП мощных вентиляторов, центробежных насосов, компрессоров, воздуходувок, испытательных установок.

8.8. ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Торможение противовключением осуществляется двумя путями. Один из них связан с изменением чередования на статоре двух фаз питающего АД напряжения. Допустим, например, что АД работает по механической характеристике 1 в точке *a* (рис. 8.21, *a*) при чередовании на статоре фаз напряжения сети ABC. Тогда при переключении двух фаз (например, *B* и *C*) АД переходит на работу по характеристике 3 в точке *d*, участок *db* которой соответствует торможению противовключением. Отметим, что при реализации торможения для ограничения тока и момента АД производится включение добавочных резисторов в цепь ротора или статора.

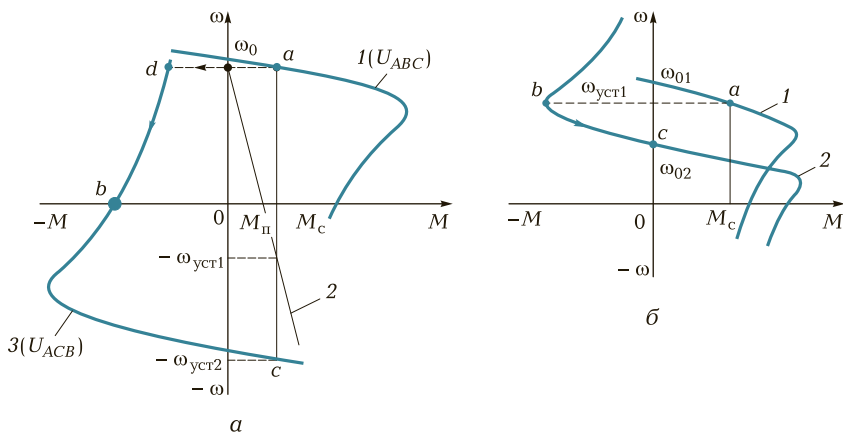


Рис. 8.21. Механические характеристики при торможении противовключением (а) и рекуперативном торможении (б):

1 — исходная характеристика; 2 и 3 — характеристики торможения

Другой путь перевода АД в режим торможения противовключением может быть использован при активном характере момента нагрузки M_c . Допустим, что требуется осуществить спуск груза, обеспечивая его торможение с помощью АД (так называемый тормозной спуск груза). Для этого АД включается на подъем с большим добавочным сопротивлением $R_{2д}$ в цепи ротора (характеристика 2). Вследствие превышения моментом нагрузки M_c пускового момента двигателя $M_{п}$ и его активного характера груз начнет опускаться с установившейся скоростью $-\omega_{уст1}$. АД при этом будет работать в режиме торможения противовключением.

Рекуперативное торможение осуществляется в том случае, когда скорость АД превышает синхронную ω_0 и он работает в генераторном режиме параллельно с сетью. Такой режим возникает, например, при переходе двухскоростного АД с высокой скорости на низкую, как это показано на рис. 8.21, б. Предположим, что в исходном положении АД работал по характеристике 1 в точке а, вращаясь со скоростью $\omega_{уст1}$. При увеличении числа пар полюсов АД переходит на работу по характеристике 2 в точке b, участок bc которой соответствует торможению с рекуперацией (отдачей) энергии в сеть.

Этот же вид торможения может быть реализован в системе «преобразователь частоты—двигатель» при останове АД или его переходе с характеристики на характеристику. Для этого осуществляется уменьшение частоты выходного напряжения ПЧ, а зна-

чит, и синхронной скорости ω_0 . В силу механической инерции текущая скорость АД ω будет изменяться медленнее, чем скорость вращения магнитного поля ω_0 , т. е. будет постоянно ее превышать. За счет этого и возникает режим торможения с отдачей энергии в сеть. Отметим, что ПЧ должен быть способен при этом передать энергию от двигателя в сеть.

Рекуперативное торможение также может быть реализовано в ЭП грузоподъемных механизмов при спуске грузов. Для этого АД включается в направлении спуска груза (характеристика 3 на рис. 8.21, а). После окончания разбега он будет работать в точке с со скоростью $-\omega_{уст2}$. При этом осуществляется процесс спуска груза с отдачей энергии в сеть.

Рекуперативное торможение является наиболее экономичным видом торможения АД.

Для **динамического торможения** обмотку статора АД отключают от сети переменного тока и подключают к источнику постоянного тока, как это показано на рис. 8.22. Обмотка ротора АД 1 при этом может быть закорочена или в ее цепь включаются добавочные резисторы 3 с сопротивлением $R_{2\Delta}$.

Постоянный ток I_{II} , значение которого может регулироваться резистором 2, протекает по обмоткам статора и создает неподвижное в пространстве магнитное поле (возбуждает АД). При вращении ротора в нем наводится ЭДС, под действием которой в обмотке протекает ток I_2' , создающий магнитный поток, также неподвижный в пространстве. Взаимодействие тока ротора с результи-

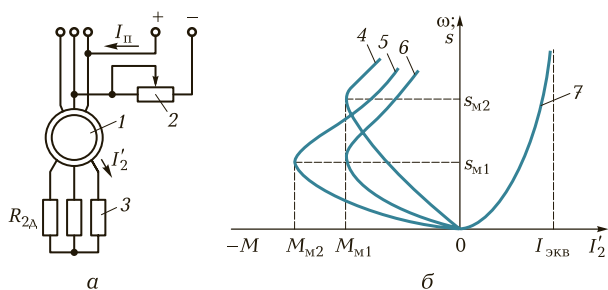


Рис. 8.22. Схема включения (а) и характеристики (б) асинхронного двигателя при динамическом торможении:

1 — двигатель; 2 — регулировочный резистор; 3 — резистор в цепи ротора; 4...6 — искусственные механические характеристики; 7 — электромеханическая характеристика

рующим магнитным полем АД создает тормозной момент, за счет которого достигается эффект торможения. Двигатель в этом случае работает в режиме генератора независимо от сети переменного тока, преобразовывая кинетическую энергию движущихся частей ЭП и рабочей машины в электрическую, которая рассеивается в виде тепла в цепи ротора.

Формулы для характеристик АД в режиме динамического торможения выводятся на основании анализа его схемы замещения. Опуская вывод формул, представим графически электромеханическую $I_2'(s)$ (кривая 7) и механические $M(s)$ кривые 4...6 характеристики АД.

Характеристика $I_2'(s)$ расположена на рисунке в первом квадранте, где $s = \omega/\omega_0$ — скольжение АД в режиме динамического торможения. Механические характеристики АД расположены во втором квадранте.

Различные искусственные механические характеристики АД в режиме динамического торможения можно получить, изменяя сопротивление $R_{2\Delta}$ добавочных резисторов Z в цепи ротора или постоянный ток $I_{п1}$, подаваемый в обмотки статора. На рис. 8.22, б показаны механические характеристики АД для различных сочетаний $I_{п1}$ и $R_{2\Delta}$. Характеристика 6 соответствует току $I_{п1}$ и сопротивлению резистора $R_{2\Delta 1}$, максимальный момент на ней равен $M_{м1}$, а скольжение, ему соответствующее, — $s_{м1}$. Увеличение сопротивления резисторов Z $R_{2\Delta 2} > R_{2\Delta 1}$ при $I_{п1} = \text{const}$ не приводит к изменению максимального момента, в то время как максимальное скольжение $s_{м}$ при этом пропорционально возрастает, что видно из характеристики 4.

Увеличение тока $I_{п1}$ ($I_{п2} > I_{п1}$) при $R_{2\Delta 1} = \text{const}$ вызывает увеличение максимального момента пропорционально квадрату тока. Характеристика двигателя в этом случае имеет вид кривой 5. Варьируя значения $I_{п1}$ и $R_{2\Delta}$, можно получить желаемый вид механических характеристик АД в режиме динамического торможения и тем самым соответствующую интенсивность торможения асинхронного ЭП.

Торможение при самовозбуждении основано на том, что после отключения АД от сети его электромагнитное поле затухает (исчезает не мгновенно) в течение некоторого, пусть и небольшого интервала времени. За счет энергии этого затухающего поля и использования специальных схем включения АД можно обеспечить его самовозбуждение и реализовать тормозной режим. На практике применение нашли так называемые конденсаторное и магнитное торможение АД.

При **конденсаторном торможении** возбуждение АД осуществляется с помощью конденсаторов, подключаемых к статору. Отметим, что конденсаторы могут подключаться к статору постоянно (глухое подключение) или с помощью дополнительного контактора, будучи при этом соединенными в схему треугольника или звезды.

Магнитное торможение реализуется после отключения статора двигателя от сети и замыкания его выводов накоротко. За счет запасенной в двигателе электромагнитной энергии происходит самовозбуждение двигателя и на его валу создается тормозной момент. Особенностью такого торможения является быстротечность, определяемая небольшим временем затухания магнитного поля двигателя, однако возникающие тормозные моменты достаточно велики и обеспечивают интенсивное торможение ЭП.

8.9. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ И ИХ ФОРМИРОВАНИЕ

В общем случае в асинхронном ЭП возникают электромагнитный переходный процесс, определяемый электромагнитной инерционностью обмоток АД, и механический, определяемый инерцией элементов механической части ЭП.

Электромагнитные переходные процессы. АД представляет собой электромеханический преобразователь энергии с несколькими магнитосвязанными между собой обмотками статора и ротора, взаимное положение которых при вращении ротора непрерывно изменяется. Вследствие этого возникающие при пуске, реверсе и торможении АД переходные токи в обмотках статора и ротора изменяются по сложным колебательным зависимостям, а определяемый ими электромагнитный момент имеет колебательный характер и является сложной функцией времени. Для примера на рис. 8.23, *а* показаны экспериментальные графики изменения во времени скорости 1 и момента 2 АД при пуске, а на рис. 8.23, *б* для сравнения — соответственно расчетные графики, построенные по формуле статической механической характеристики. Нетрудно отметить их существенное различие.

Большое влияние на характер переходных процессов при реверсе и торможении АД оказывает оставшееся магнитное поле, так как при отключении двигателя его магнитный поток не может мгновенно снизиться до нуля. Наличие этого потока оказывает неблагоприятное воздействие на переходные процессы и вызывает

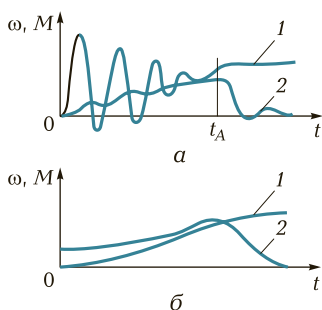


Рис. 8.23. Кривые переходных процессов при учете электромагнитных процессов (а) и без учета электромагнитных процессов (б): 1 — графики скорости; 2 — графики момента

увеличение максимальных переходных моментов АД при реверсе и торможении. Пики переходных электромагнитных моментов двигателя при пуске в 3...5, а при реверсе в 12...18 раз превышают его номинальный момент.

Переходные процессы в АД описываются системой дифференциальных уравнений, которые по своей природе нелинейны и содержат периодические коэффициенты, поэтому нахождение зависимостей $\omega(t)$ и $M(t)$ целесообразно производить с помощью ЭВМ.

Механические переходные процессы в асинхронном ЭП описываются основным уравнением механического движения (5.16), в котором моменты АД $M(\omega)$ и исполнительного органа $M_c(\omega)$ в общем случае являются нелинейными функциями скорости (скольжения). Получение искомых зависимостей $s(t)$, $\omega(t)$ и $M(t)$ было рассмотрено ранее.

Переходные процессы в системе «преобразователь частоты — асинхронный двигатель» (ПЧ—АД), схема которой показана на рис. 8.24, могут быть сформированы близкими по своему характеру к переходным процессам в системе УВ—ДПТНВ. Для этого используется задатчик интенсивности 1, который при поступлении сигнала задания $U_{3,c}$ формирует нужный закон изменения сигнала управления $U_y(t)$ на входе ПЧ 2 и позволяет за счет этого получить требуемые графики изменения скорости и момента АД 3 в переходном процессе. Необходимо отметить, что реализуемое при этом плавное изменение частоты и подаваемого на АД напряжения обуславливает частичное или полное устранение влияния электромагнитных переходных процессов.

Для примера на рис. 8.24, б показана на плоскости механических характеристик траектория пуска, реверса и торможения вхолостую АД при линейном законе изменения частоты, а следовательно, скорости магнитного поля двигателя $\omega_0(t)$. Пуску АД соответствует участок $0ab$, реверсу — участок bcd и торможению —

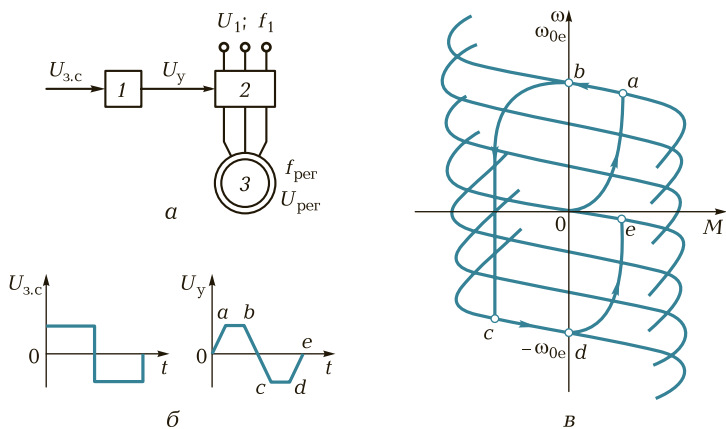


Рис. 8.24. Схема включения (а), графики сигналов управления (б) и характеристики (в) асинхронного двигателя при формировании переходных процессов:

1 — датчик интенсивности; 2 — преобразователь частоты; 3 — двигатель

участок $de0$ этой траектории. Отметим, что при торможении АД (за исключением участка $0e$) происходит рекуперация (отдача) энергии в сеть, что экономически целесообразно.

Для построения кривых переходного процесса $\omega(t)$ и $M(t)$ можно использовать формулы для системы «преобразователь — двигатель», считая при этом, что работа АД происходит на линейных участках его механических характеристик.

Формирование переходных процессов в системе «регулятор напряжения — АД». Как уже отмечалось ранее, для переходных процессов в асинхронном ЭП в общем случае характерны значительные по амплитуде пики электромагнитного момента, что обуславливает дополнительные динамические усилия в его механической части и может даже вызвать поломку ее элементов. В тех случаях, когда нежелательно или недопустимо воздействие переходного электромагнитного момента на кинематическую схему ЭП, часто прибегают к формированию момента АД с помощью тиристорных регуляторов напряжения (ТРН). За счет плавного увеличения подводимого к АД напряжения при определенной последовательности подключения его фазных обмоток к сети обеспечивается эффект снижения пиков электромагнитного момента АД. На рис. 8.25, а показано изменение момента 1 и скорости 2 АД в процессе пуска при скачкообразном, а на рис. 8.25, б — при экспоненциальном характере изменения прикладываемого к АД напряже-

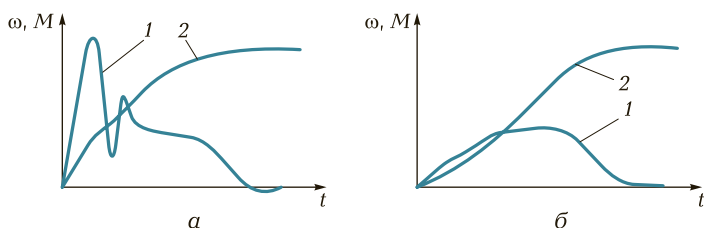


Рис. 8.25. Графики момента 1 и скорости 2 без регулирования напряжения (а) и при снижении напряжения (б)

ния. Если в первом случае максимум момента примерно в два раза превосходит критический момент A_D , то во втором случае при нарастании напряжения по экспоненте с постоянной времени около 0,025 с колебательный характер электромагнитного момента практически не проявляется. Скорость изменения прикладываемого к A_D напряжения может изменяться также и по любому другому закону, например линейному.

Использование ТРН позволяет решить и еще одну важную практическую задачу — обеспечить регулирование (ограничение) пусковых токов A_D , необходимость в чем возникает при пуске двигателей большой (несколько сотен или тысяч кВт) мощности. При прямом (без токоограничения) пуске мощных двигателей возникающие при этом значительные пусковые токи приводят к снижению напряжения в питающей сети, что отрицательно влияет на работу других электроприемников и приводит к значительным электромагнитным, механическим и тепловым перегрузкам элементов самого ЭП. Плавное изменение прикладываемого к A_D при его пуске напряжения позволяет существенно снизить эти отрицательные явления. ТРН, которые предназначены для формирования желаемых графиков момента и тока A_D в переходных процессах, получили название пускателей, или «мягких» стартеров.

8.10. СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Типовые схемы релейно-контакторного управления A_D строятся по тем же принципам, что и схемы управления ДПТ.

Типовые схемы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Двигатели этого типа малой и средней мощности обычно запускаются прямым подключением к сети без

ограничения пусковых токов. В этих случаях они управляются с помощью магнитных пускателей, которые одновременно обеспечивают и некоторые виды их защиты.

Схема управления асинхронным двигателем с использованием магнитного пускателя (рис. 8.26) включает в себя магнитный пускатель, состоящий из контактора *КМ* и двух встроенных в него тепловых реле защиты *КК*. Такая схема обеспечивает прямой (без ограничения тока и момента) пуск АД, отключение его от сети, а также защиту от коротких замыканий (предохранители *FA*) и перегрузки (тепловые реле *КК*).

Для пуска двигателя замыкается выключатель *QF* и нажимается кнопка пуска *SB1*. При этом получает питание катушка контактора *КМ*, который, включившись, своими главными силовыми контактами в цепи статора подключает двигатель к источнику питания, а вспомогательным контактом шунтирует кнопку *SB1*. Происходит разбег асинхронного двигателя по его естественной характеристике.

При нажатии кнопки остановки *SB2* контактор *КМ* теряет питание и отключает АД от сети. Начинается процесс торможения асинхронного двигателя выбегом под действием момента нагрузки на его валу.

Реверсивная схема управления асинхронным двигателем. Основным элементом этой схемы является реверсивный магнитный пускатель, который включает в себя два линейных контактора *КМ1* и *КМ2* и два тепловых реле защиты *КК* (рис. 8.27). Такая схе-

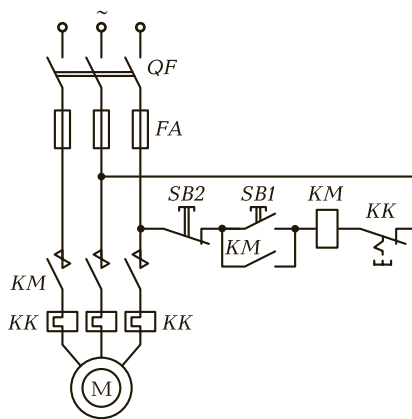


Рис. 8.26. Схема управления асинхронным двигателем с использованием нереверсивного магнитного пускателя

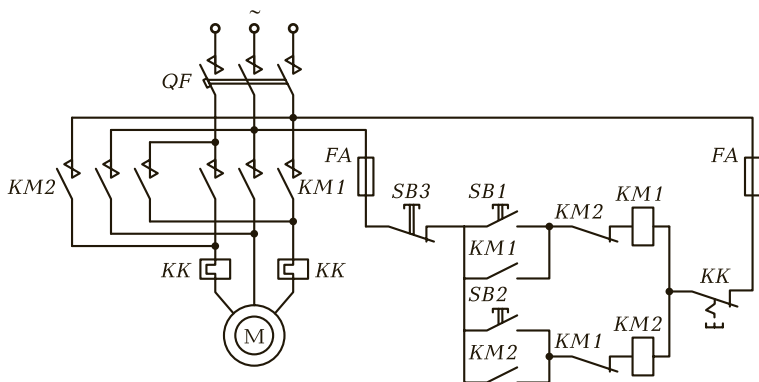


Рис. 8.27. Схема управления асинхронным двигателем с использованием реверсивного магнитного пускателя (пояснения приведены в тексте)

ма обеспечивает прямой пуск и реверс асинхронного двигателя, а также торможение АД противовключением при ручном (неавтоматическом) управлении.

В этой схеме предусмотрена также защита от перегрузок АД (реле *KK*) и коротких замыканий в цепях статора (автоматический выключатель *QF*) и управления (предохранители *FA*). Кроме того, в ней обеспечивается и нулевая защита от исчезновения (снижения) напряжения сети (контакты *KM1* и *KM2*).

Пуск двигателя в условных направлениях «Вперед» или «Назад» осуществляется нажатием соответственно кнопок *SB1* или *SB2*, что приводит к срабатыванию контакторов *KM1* или *KM2* и подключению АД к сети (при включенном автоматическом выключателе *QF*).

Для обеспечения реверса или торможения двигателя сначала нажимается кнопка *SB3*, что приводит к отключению включенного до тех пор контактора (например, *KM1*), а затем — кнопка *SB2*, что приводит к включению контактора *KM2* и подаче на АД напряжения питания с другим чередованием фаз. После этого магнитное поле двигателя изменяет свое направление вращения и начинается процесс реверса, состоящий из двух этапов — торможения противовключением и разбега в противоположную сторону.

В случае необходимости только затормозить двигатель при достижении им нулевой скорости следует вновь нажать кнопку *SB3*, что приведет к отключению его от сети и возвращению схемы в исходное положение. Если же кнопку *SB3* не нажимать, последует разбег АД в другую сторону, т. е. его реверс.

Во избежание короткого замыкания в цепи статора, которое может возникнуть в результате одновременного ошибочного нажатия кнопок *SB1* и *SB2*, в реверсивных магнитных пускателях иногда предусматривается специальная механическая блокировка. Она представляет собой рычажную систему, которая предотвращает одновременное включение двух контакторов. В дополнение к механической в такой схеме используется типовая электрическая блокировка, применяемая в реверсивных схемах управления, которая заключается в перекрестном включении размыкающих контактов аппарата *KM1* в цепь катушки аппарата *KM2*, и наоборот.

Отметим, что повышению надежности работы ЭП и удобства его в эксплуатации способствует использование в схеме управления воздушного автоматического выключателя *QF*, который исключает возможность работы привода при обрыве одной фазы и при однофазном коротком замыкании, как это может иметь место при использовании предохранителей.

Типовая схема управления асинхронным двигателем, обеспечивающая его прямой пуск и динамическое торможение в функции времени (рис. 8.28). Пуск двигателя в этом случае осуществляется нажатием кнопки *SB1*, после чего срабатывает линейный контактор *KM*, подключающий двигатель к источнику питания. Одновременное замыкание контакта *KM* в цепи реле времени *KT* вызовет срабатывание последнего и замыкание его контак-

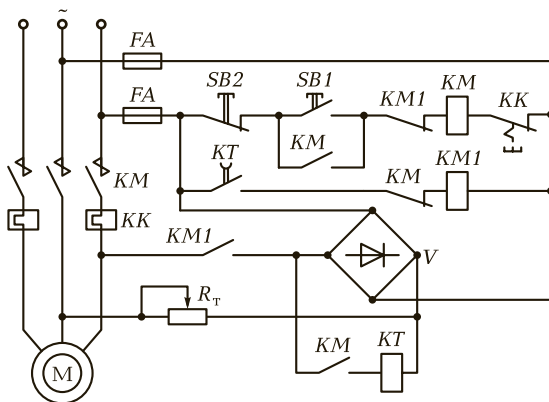


Рис. 8.28. Схема управления пуском и динамическим торможением асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (пояснения приведены в тексте)

та в цепи контактора торможения $KM1$, который тем не менее не сработает, так как в этой цепи разомкнулся размыкающий контакт KM .

Для остановки АД необходимо нажать кнопку $SB3$. Тогда контактор KM отключится и, разомкнув свои контакты в цепи статора, отключит двигатель от сети переменного тока. Одновременно с этим замкнется контакт KM в цепи аппарата $KM1$ и разомкнется контакт KM в цепи реле KT , что приведет к включению контактора торможения $KM1$, подаче в обмотки статора постоянного тока от выпрямителя V через резистор R_r и переводу двигателя в режим динамического торможения.

Реле времени KT , потеряв питание, начнет отсчет выдержки времени. Через некоторый интервал времени, соответствующий времени останова двигателя, реле KT разомкнет свой контакт в цепи контактора $KM1$, контактор отключится и прекратит подачу постоянного тока в цепь статора. Схема вернется в исходное положение.

Интенсивность динамического торможения регулируется резистором R_r , с помощью которого устанавливается необходимый постоянный ток в статоре двигателя.

Для исключения возможности одновременного подключения статора к источникам переменного и постоянного токов в данной схеме используется типовая блокировка с помощью размыкающих контактов KM и $KM1$, включенных перекрестно в цепи катушек этих аппаратов.

Типовые схемы управления асинхронным двигателем с фазным ротором, которые рассчитываются в основном на среднюю и большую мощности, должны предусматривать ограничение токов при пуске, реверсе и торможении с помощью добавочных резисторов в цепи ротора. В некоторых случаях резисторы в цепь ротора включаются в целях увеличения пускового момента двигателя.

Панель типа ПДУ6220 (рис. 8.29) входит в состав нормализованной серии панелей управления АД с фазным и короткозамкнутым ротором и обеспечивает их пуск в две ступени и динамическое торможение в функции времени.

При подаче на схему напряжения постоянного тока 220 В и напряжения переменного тока 380 В рубильниками $Q1$, $Q2$ и автоматом QF включается реле времени $KT1$, подготавливая двигатель к пуску с полным пусковым резистором в цепи ротора. Одновременно, если рукоятка командоконтроллера SA находится в нулевой (средней) позиции и максимально-токовые реле $FA1...FA3$ не

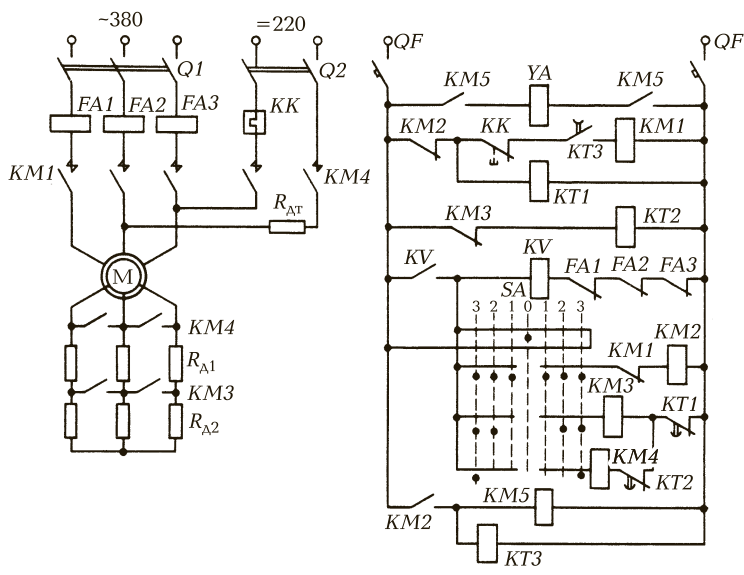


Рис. 8.29. Схема асинхронного электропривода с использованием типовой панели управления (пояснения приведены в тексте)

включены, срабатывает реле защиты *KV* от понижения питающего напряжения, подготавливая схему к работе.

Пуск двигателя осуществляется по одной из искусственных или естественной характеристике, для чего рукоятка *SA* соответственно устанавливается в положения 1, 2 или 3. При этом включаются линейный контактор *KM1*, подключающий АД к сети, контактор управления тормозом *KM5*, подключающий к сети катушку *YA* электромагнитного тормоза, который при этом растормаживает двигатель, и реле времени *KT3*, управляющее процессом динамического торможения. При переводе рукоятки *SA* в положение 2 или 3 включаются также контакторы ускорения *KM3* и *KM4* и двигатель начинает разгоняться.

Торможение двигателя происходит при переводе рукоятки *SA* в нулевое (среднее) положение. При этом отключаются контакторы *KM2* и *KM5* и включается контактор динамического торможения *KM4*, который подключает АД к источнику постоянного тока. В результате происходит процесс комбинированного (механического и динамического) торможения двигателя, который заканчивается после отсчета реле *KT3* выдержки времени, соответствующей времени торможения.

Замкнутые ЭП с двигателями переменного тока до недавнего времени применялись относительно редко. В последние годы в связи с появлением разнообразных средств управления, и в первую очередь полупроводниковых силовых преобразователей, регулируемый ЭП переменного тока начал быстро развиваться. Рассмотрим некоторые примеры выполнения таких ЭП.

Замкнутая схема управления асинхронного ЭП, выполненного по системе «тиристорный регулятор напряжения — двигатель» (ТРН—АД). Рассмотрим схему регулирования скорости АД с контактными кольцами и обратной связью по скорости (рис. 8.30, а). В этой схеме между сетью и статором АД включен тиристорный регулятор напряжения ТРН, силовую часть которого образуют три пары соединенных встречно-параллельно тиристоров $VS1 \dots VS6$. Управляющие электроды тиристоров подсоединены к выходам

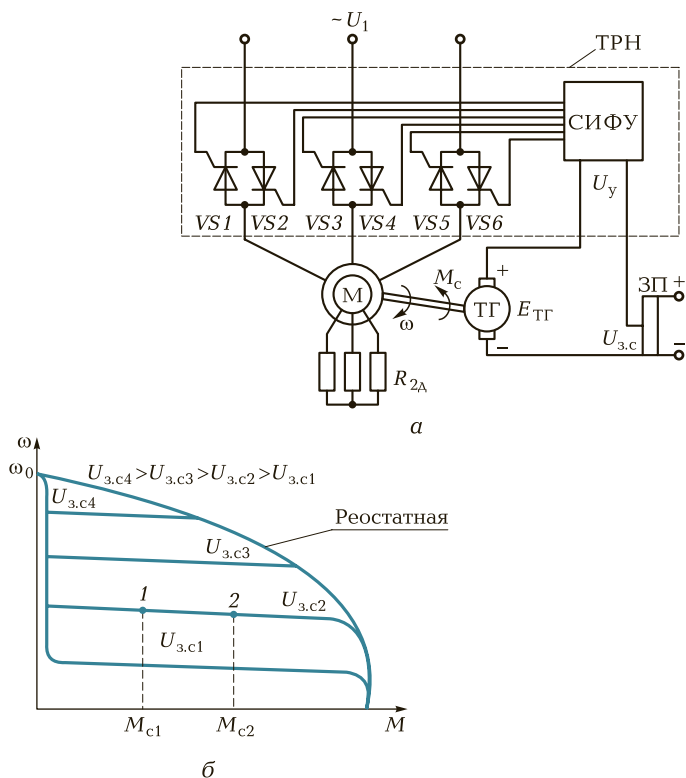


Рис. 8.30. Схема (а) и характеристики (б) замкнутого асинхронного ЭП с использованием регулятора напряжения и обратной связи по скорости

СИФУ, которая распределяет управляющие импульсы на все тиристоры и осуществляет их сдвиг в зависимости от входного сигнала управления U_y . К валу двигателя для реализации обратной связи по скорости подсоединен тахогенератор ТГ, ЭДС которого $E_{ТГ}$ сравнивается с задающим напряжением скорости $U_{3.c}$, снимаемым с задающего потенциометра ЗП. Эти напряжения действуют навстречу друг другу и их разность образует сигнал управления

$$U_y = U_{3.c} - E_{ТГ} = U_{3.c} - \gamma\omega, \quad (8.32)$$

который поступает на вход СИФУ. При увеличении этого сигнала угол управления тиристорами уменьшается, а подаваемое на двигатель напряжение увеличивается, и наоборот. Важно отметить, что при снижении скорости АД в цепи ротора выделяются потери мощности (потери скольжения), которые вызывают его дополнительный нагрев и снижают экономичность работы ЭП. Для облегчения теплового режима при работе двигателя на пониженных скоростях в цепь его ротора включается добавочный резистор $R_{2д}$, наличие которого позволяет также расширить диапазон регулирования скорости.

Рассмотрим работу ЭП при изменении момента нагрузки M_c на валу двигателя и постоянном сигнале задания скорости $U_{3.c2}$. Допустим, что в исходном положении АД работал в точке 1 с моментом нагрузки M_{c1} (рис. 8.30, б), а затем произошло его увеличение до значения M_{c2} . В этом случае скорость начнет снижаться и соответственно начнет уменьшаться ЭДС тахогенератора $E_{ТГ}$, что вызовет согласно (8.32) увеличение напряжения управления U_y и уменьшение угла управления тиристорами, а значит, приведет к увеличению подаваемого на АД напряжения. Момент АД будет увеличиваться и в точке 2 сравняется с моментом нагрузки M_{c2} . Таким образом, увеличение момента нагрузки приводит к небольшому снижению скорости АД, или, другими словами, его характеристики становятся жесткими. При уменьшении момента нагрузки M_c будет автоматически происходить снижение напряжения на АД, т. е. его скорость вращения будет поддерживаться на заданном уровне.

Изменяя с помощью потенциометра ЗП значение задающего напряжения скорости $U_{3.c}$, можно получить ряд механических характеристик электропривода с относительно высокой жесткостью и необходимой перегрузочной способностью АД. Отметим, что при этом регулирование скорости сопровождается увеличением потерь мощности в АД и требует завышения его мощности.

Замкнутый ЭП с частотным управлением АД. Примером замкнутого ЭП переменного тока с частотным управлением может служить привод серии ЭКТ и ее модификации ЭКТ2. Эти ЭП обеспечивают регулирование скорости, тока и момента двигателя за счет изменения частоты и значения подводимого к нему напряжения. Упрощенная функциональная схема такого ЭП показана на рис. 8.31, а. Здесь в качестве силового преобразователя используется тиристорный преобразователь частоты со звеном постоянного тока, состоящий из управляемого выпрямителя УВ и инвертора напряжения ИН со своими схемами управления СУВ и СУИ. Между УВ и ИН включен силовой фильтр Φ , обеспечивающий фильтрацию выходного напряжения УВ и необходимую циркуляцию реактивной энергии в силовой части схемы.

Схема управления такого ЭП строится по принципу подчиненного регулирования координат и имеет два контура — внутренний (тока) и внешний (напряжения). Регулирование этих координат осуществляется пропорционально-интегральными регуляторами

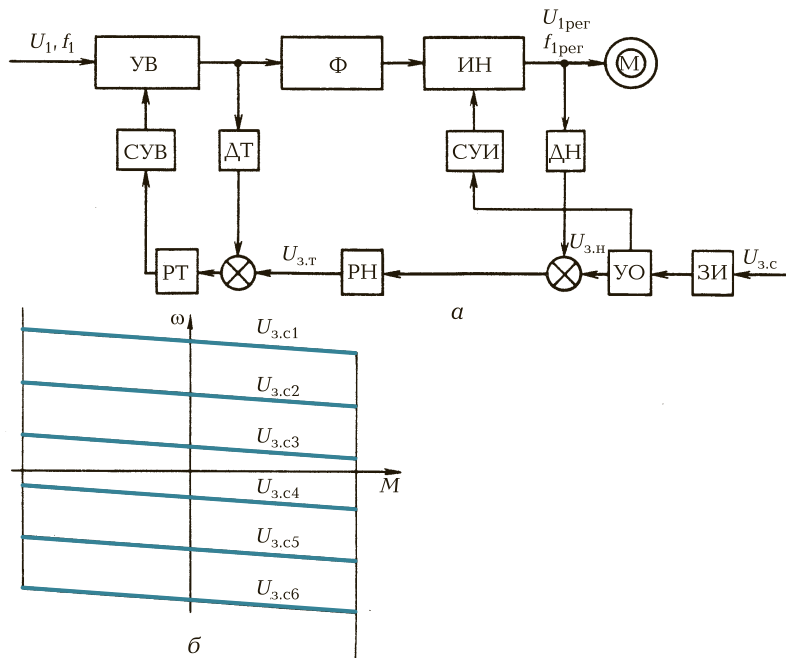


Рис. 8.31. Схема (а) и характеристики (б) асинхронного электропривода при частотном управлении

тока РТ и напряжения РН по сигналам датчиков тока ДТ и напряжения ДН. При частотах ниже номинальной схема управления поддерживает отношение напряжения к частоте постоянным, а при частотах выше номинальной напряжение остается неизменным, что обеспечивается усилителем-ограничителем УО.

Преобразователь частоты обеспечивает рабочие диапазоны изменения частоты 5...80 Гц при номинальной частоте 50 Гц и 15...240 Гц при номинальной частоте 200 Гц. Диапазон регулирования напряжения составляет 0...380 В. Серия ЭКТ2 выпускается на мощности от 16,5 до 263,5 кВт. КПД этих ЭП лежит в пределах 85...96 %.

Примерный вид механических характеристик такого ЭП при различных задающих сигналах скорости $U_{з.с}$ показан на рис. 8.31, б.

ЭП этой серии могут обеспечивать торможение с рекуперацией (отдачей) энергии в сеть. В этом случае силовая часть ЭП дополняется ведомым сетью инвертором, а в обозначении ЭП появляется буква Р (ЭКТР и ЭКТ2Р).

Кроме перечисленных элементов схема управления серии ЭКТ содержит ряд не показанных на ней устройств, обеспечивающих получение необходимых статических и динамических характеристик ЭП, например усилитель сигнала задатчика интенсивности ЗИ и устройство устранения колебаний.

Для повышения надежности работы ЭП в схеме предусматривается ряд защит и сигнализаций. Одной из основных является защита по току. Если потребляемый ЭП ток из сети превосходит ток уставки, равный $3I_{ном}$, то система защиты обеспечивает снятие управляющих импульсов с тиристоров инвертора напряжений и одновременное открытие тиристоров специального узла силового токоограничения, включенного параллельно силовому фильтру Ф. Благодаря этому конденсатор фильтра разрядится через дроссели, что в свою очередь защитит тиристоры ИН от пробоя.

Кроме того, в схемах серии ЭКТ предусмотрены защиты от коротких замыканий, снижения питающего напряжения ниже $0,85U_{ном}$, обрыва фазы, прекращения принудительной вентиляции тиристоров и тепловая.

Замкнутая схема импульсного регулирования скорости АД с помощью резистора в цепи ротора. В схеме ЭП (рис. 8.32) с импульсным регулированием сопротивления в цепи выпрямленного тока ротора для получения жестких характеристик используется отрицательная обратная связь по скорости двигателя. Схема работает следующим образом. В роторную цепь АД включен неуправ-

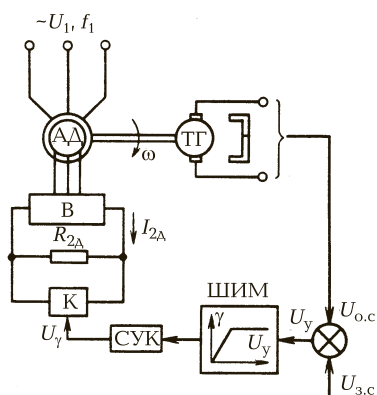


Рис. 8.32. Схема замкнутого асинхронного электропривода с импульсным регулированием сопротивления добавочного резистора в цепи ротора

ляемый трехфазный выпрямитель B , к выходу которого подключен резистор $R_{2\Delta}$. Параллельно резистору включен управляемый ключ K . Управление этим ключом происходит от широтно-импульсного модулятора ШИМ, на вход которого поступают сигналы задания $U_{3.c}$ и обратной связи $U_{o.c}$ по скорости. При поступлении на вход блока ШИМ сигнала ошибки $U_y = U_{3.c} - U_{o.c}$ он начинает генерировать импульсы управления, которые с помощью схемы управления ключом СУК распределяются по тиристорам ключа K , вызывая периодическое включение и закорачивание резистора $R_{2\Delta}$.

Принцип получения жестких характеристик ЭП соответствует рассмотренному ранее механизму действия обратной связи по скорости и состоит в следующем. Допустим, что АД работает в установившемся режиме при каком-то заполнении (скважности) ключа K , т. е. при соответствующем эквивалентном сопротивлении цепи ротора. Пусть по каким-то причинам произошло увеличение момента нагрузки АД, в результате чего начинает снижаться его скорость. Тогда в соответствии с формулой (8.32) сигнал управления U_y начнет повышаться, что вызовет увеличение заполнения γ работы ключа K и уменьшение эквивалентного сопротивления в цепи ротора $R_{2э\kappa\text{в}} = (1 - \gamma)R_{2\Delta}$. Это, в свою очередь, приведет к увеличению тока в роторе и момента АД, а значит, к прекращению снижения скорости, что соответствует получению жестких характеристик ЭП. Для обеспечения регулирования (ограничения) тока и момента двигателя данную схему необходимо дополнить контуром регулирования тока. В этом случае механические характеристики будут иметь вертикальный участок, соответствующий заданному уровню ограничения тока и момента.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие серии АД выпускаются электротехнической промышленностью?
2. Что такое схема замещения АД?
3. В каких энергетических режимах может работать АД?
4. Какими способами можно получить искусственные механические характеристики АД?
5. Какие достоинства и недостатки имеет способ регулирования координат АД с помощью резисторов?
6. Какие возможности по управлению АД обеспечивает регулирование напряжения на его статоре?
7. В чем состоит принцип регулирования экономичности АД?
8. Почему при частотном способе регулирования происходит также и изменение подводимого к АД напряжения?
9. Какие типы ПЧ вы знаете?
10. Поясните принцип действия ПЧ с непосредственной связью.
11. Поясните принцип действия управляемых инверторов и назовите основные их виды.
12. За счет чего в частотно-управляемом асинхронном ЭП производится регулирование подводимого к АД напряжения?
13. Поясните принцип получения различного числа пар полюсов многоскоростного АД.
14. Каковы причины появления каскадных схем включения АД?
15. Назовите виды каскадных схем и поясните принцип регулирования скорости АД в этих схемах.
16. В чем сущность импульсного способа регулирования координат ЭП с АД?
17. Для чего служат замкнутые ЭП с импульсным регулированием?
18. Какими способами осуществляется торможение АД в его основной схеме включения?
19. Что такое динамическое торможение АД?
20. В чем основная особенность переходных процессов в асинхронном ЭП?
21. Какими путями достигается формирование переходных процессов в асинхронном ЭП?

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

9.1. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Синхронные трехфазные двигатели (СД) широко применяются в ЭП самых разнообразных рабочих машин и механизмов, что объясняется их высокими технико-экономическими показателями. СД имеют высокий коэффициент мощности $\cos \varphi$, близкий к единице или даже опережающий. Способность СД работать с опережающим $\cos \varphi$ и отдавать при этом в сеть реактивную мощность позволяет улучшать режим работы и экономичность системы электроснабжения. КПД современных СД составляет 96...98%, что на 1,0...1,5% больше КПД АД с теми же габаритными размерами и скоростью.

В синхронных двигателях возможно регулирование перегрузочной способности посредством регулирования тока возбуждения, причем она меньше зависит от напряжения сети, чем в АД. Синхронный двигатель обладает абсолютно жесткой механической характеристикой. Важным преимуществом конструкции СД является наличие большого воздушного зазора, вследствие чего его характеристики и свойства мало зависят от износа подшипников и неточности монтажа ротора.

Статор СД, схема включения которого показана на рис. 9.1, *а*, выполняется аналогично статору асинхронного двигателя с трехфазной обмоткой, подключаемой к сети переменного тока. Ротор СД имеет обмотки возбуждения и пусковую короткозамкнутую в виде беличьей клетки. Конструктивно ротор СД может быть явнополюсным и неявнополюсным в виде цилиндра. В качестве источника для питания обмотки возбуждения чаще всего используется генератор постоянного тока небольшой мощности (0,3...3,0% мощности СД), называемый возбудителем, который устанавливается на одном валу с двигателем *1*. Регулирование тока возбужде-

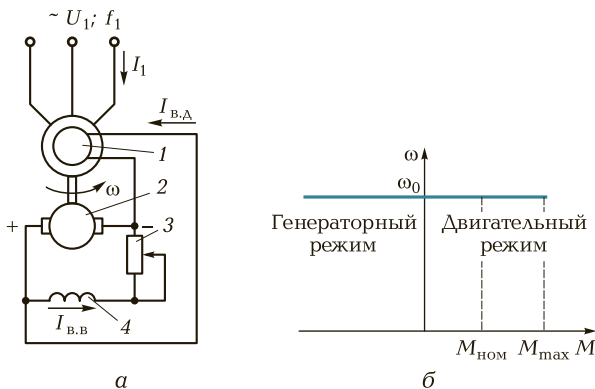


Рис. 9.1. Схема включения (а) и механическая характеристика (б) синхронного двигателя:

1 — двигатель; 2 — возбудитель; 3 — регулировочный резистор; 4 — обмотка возбуждения возбудителя

ния двигателя $I_{в.д}$ осуществляется изменением с помощью резистора 3 тока $I_{в.в}$ обмотки возбуждения возбудителя 4. Отметим, что в современных схемах автоматического регулирования возбуждения (АРВ) СД широко применяются тиристорные управляемые выпрямители (тиристорные возбудители).

Вращающий момент СД обусловлен взаимодействием вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, и магнитного поля, создаваемого обмоткой возбуждения или постоянными магнитами на роторе. Взаимодействие этих полей может создать постоянный по направлению вращающий момент СД только в том случае, когда ротор будет вращаться со скоростью магнитного поля $\omega_0 = 2\pi f_1/p$, т. е. синхронно с вращающимся полем. Таким образом, механическая характеристика СД $\omega(M)$ (рис. 9.1, б) представляет собой горизонтальную линию с ординатой ω_0 , которая имеет место до некоторого максимального момента нагрузки M_{\max} , превышение которого приводит к выпаданию СД из синхронизма, т. е. к нарушению синхронного вращения ротора и магнитного поля.

Для определения максимального момента нагрузки M_{\max} , до которого сохраняется синхронная работа двигателя с сетью, служит угловая характеристика СД (рис. 9.2). Она отражает зависимость момента M от угла сдвига θ между векторами ЭДС статора E и фазного напряжения сети U_{ϕ} .

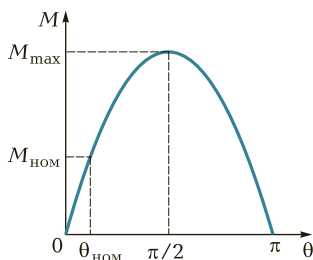


Рис. 9.2. Угловая характеристика синхронного двигателя

Момент СД представляет собой синусоидальную функцию угла θ :

$$M = 3U_{\phi}E \sin \theta / (\omega_0 x_1) = M_{\max} \sin \theta, \quad (9.1)$$

где U_{ϕ} — фазное значение напряжения сети; E — ЭДС в обмотке статора СД; x_1 — индуктивное сопротивление фазы обмотки СД; ω_0 — скорость вращения магнитного поля.

Максимального значения момент СД достигает при $\theta = \pi/2$. Угол сдвига характеризует собой перегрузочную способность СД: при больших значениях θ двигатель выпадает из синхронизма, при небольших — его работа устойчива. Номинальные значения угла $\theta_{\text{ном}}$ составляют обычно $25 \dots 30^\circ$, им соответствует номинальный момент $M_{\text{ном}}$, и кратность максимального момента в этом случае $\lambda_m = M_{\max} / M_{\text{ном}} = 2,0 \dots 2,5$.

СД может работать во всех основных энергетических режимах.

9.2. ПУСК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

При неподвижном роторе и подключении обмотки статора к сети переменного тока и обмотки возбуждения к источнику постоянного тока из-за постоянно изменяющихся взаимных направлений магнитных полей статора и ротора СД будет развивать не постоянный по направлению, а знакопеременный вращающий момент, а следовательно, СД не сможет разогнаться до синхронной скорости ω_0 без применения специальных мер по его запуску.

Один из способов пуска, который в настоящее время находит ограниченное применение, связан с использованием небольшого по мощности вспомогательного двигателя, устанавливаемого на валу СД. С помощью этого двигателя ротор ненагруженного СД разгоняется до синхронной скорости, после чего осуществляется его синхронизация с сетью. В системах «СД — генератор постоянного тока» в качестве вспомогательного двигателя может использоваться генератор, работающий в период пуска в двигательном режиме.

Наибольшее же распространение получил другой способ пуска СД, называемый асинхронным. Для его реализации на роторе СД укладывается дополнительная пусковая обмотка, выполняемая

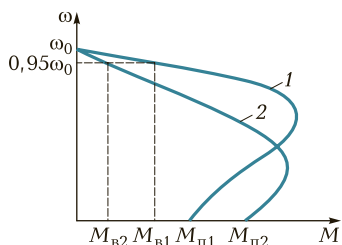


Рис. 9.3. Пусковые механические характеристики синхронного двигателя:

1 — при небольшом пусковом и повышенном входном моментах; 2 — при повышенном пусковом и небольшом входном моментах

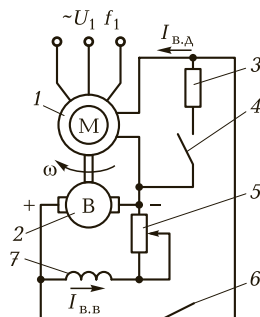


Рис. 9.4. Схема возбуждения синхронного двигателя:

1 — двигатель; 2 — возбудитель; 3 — резистор; 4 и 6 — контакты; 5 — регулировочный резистор; 7 — обмотка возбуждения возбудителя; В — возбудитель

аналогично короткозамкнутой обмотке АД типа беличьей клетки. В этом случае при подключении СД к сети переменного тока происходит его разбег аналогично АД. При подсинхронной скорости СД, отличающейся от синхронной на несколько процентов, ток подается в обмотку возбуждения двигателя и он втягивается в синхронизм с сетью.

В зависимости от своих параметров пусковая обмотка СД обеспечивает два основных вида механической пусковой характеристики (рис. 9.3). Характеристика 1 обеспечивает более высокий синхронизирующий (входной) момент $M_{в1}$ по сравнению с характеристикой 2, но меньший начальный (пусковой) момент $M_{п1} < M_{п2}$. Выбор вида пусковой характеристики СД определяется конкретными условиями его работы.

При пуске СД используются две основные схемы его возбуждения. При использовании схемы с подключением возбудителя в конце пуска, показанной на рис. 9.4, на первом этапе пуска контакт 6 разомкнут, а контакт 4 замкнут. Обмотка возбуждения двигателя 1 оказывается замкнутой на резистор 3 и асинхронный пуск происходит в благоприятных условиях. В конце пуска при достижении подсинхронной скорости по команде специального реле управления, в качестве которого могут быть использованы реле частоты, тока или времени, контакт 4 размыкается, а контакт 6 замыкается. В результате в обмотку возбуждения подается ток от возбудителя В и СД втягивается в синхронизм. Регулирование

тока возбуждения осуществляется резистором 5 в цепи обмотки возбуждения 7 возбудителя.

Вторая схема возбуждения СД (см. рис. 9.1, а) более простая, получила название схемы с постоянно (глухо) подключенным возбудителем. В этой схеме обмотка возбуждения с самого начала пуска постоянно подключена к возбудителю 2. При скорости $\omega \approx 0,7\omega_0$ происходит самовозбуждение возбудителя и в обмотку возбуждения СД подается ток возбуждения, благодаря чему при достижении подсинхронной скорости двигатель втягивается в синхронизм.

Пуск по схеме, показанной на рис. 9.1, а, происходит в менее благоприятных условиях, так как пусковой момент СД оказывается ниже, чем при использовании схемы, показанной на рис. 9.4, что затрудняет его синхронизацию. Поэтому эта схема применяется при относительно легких условиях пуска СД, когда момент нагрузки на его валу не превосходит 50% его номинального момента, а инерционные массы ЭП и исполнительного органа невелики. При более трудных условиях возбудитель подключается в конце пуска.

Пуск СД может происходить с ограничением пускового тока или без него. В большинстве случаев СД мощностью до нескольких сотен киловатт (а иногда и более) при наличии мощной питающей сети запускаются прямым подключением к сети без ограничения тока. Кратность пускового тока по отношению к номинальному при прямом пуске составляет обычно 4...5.

При пуске СД большей мощности (несколько тысяч киловатт), соизмеримой с мощностью питающей сети, возникает необходимость ограничения пусковых токов, что достигается чаще всего использованием добавочных резисторов, реакторов или автотрансформаторов.

Замыкая выключатель 1 в схеме с реактором (рис. 9.5, а), при отключенном выключателе 2 осуществляют пуск СД 4 с реактором 3 в цепи статора, обеспечивающим снижение пускового тока до допустимого уровня. При достижении СД подсинхронной скорости замыкают выключатель 2, который шунтирует реактор, и двигатель оказывается подключенным к сети. Автоматизация пуска осуществляется обычно в функции времени. В некоторых схемах вместо реактора применяются более дешевые активные резисторы.

В случае использования автотрансформатора 5 (рис. 9.5, б) при пуске замыкают выключатели 1 и 6 и к СД 4 подводится пониженное напряжение. При достижении им подсинхронной скорости отключается выключатель 6, замыкается выключатель 2 и СД подключается непосредственно к выводам питающей сети.

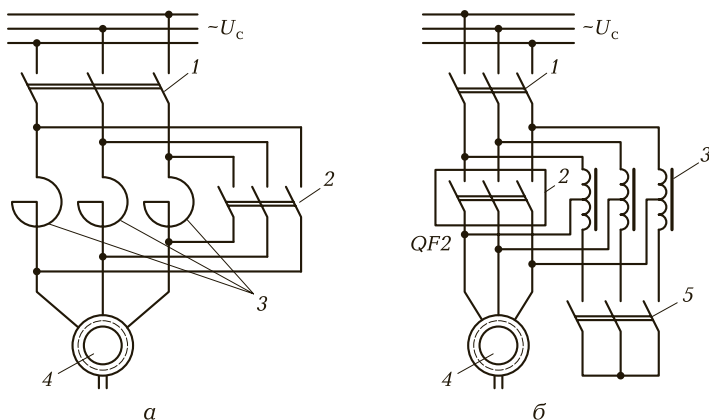


Рис. 9.5. Схемы при ограничении пускового тока с использованием реакторов (а) и автотрансформатора (б):

1 — автоматический выключатель; 2 и б — выключатели; 3 — элементы реактора; 4 — двигатель (СД); 5 — автотрансформатор

При использовании автотрансформатора пусковой ток снижается пропорционально квадрату отношения напряжений СД и сети (U_A/U_C)², а при использовании реакторов или резисторов — пропорционально этому отношению. Однако автотрансформаторный способ пуска является более сложным, дорогим и менее надежным по сравнению с реакторным (резисторным) и применяется реже.

В настоящее время для ограничения пускового тока СД широко используются тиристорные регуляторы напряжения (ТРН).

Отметим, что при питании СД от преобразователя частоты может быть реализован так называемый частотный пуск, обеспечивающий с помощью специального задатчика такой темп изменения частоты питающего СД напряжения (а следовательно, и скорости вращения его магнитного поля), при котором ротор «успекает» за полем и двигатель работает синхронно с источником питания уже с самых малых своих скоростей. Для такого способа пуска характерны к тому же и меньшие потери энергии в двигателе при пуске.

9.3. ТОРМОЖЕНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Торможение СД, как и любого другого электродвигателя, осуществляется переводом его в генераторный режим. Наиболее часто при этом используется схема динамического торможения, показан-

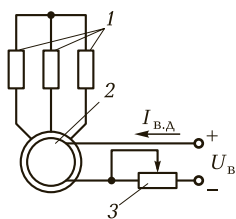


Рис. 9.6. Схема динамического торможения синхронного двигателя:

1 — резисторы в цепи статора; 2 — двигатель; 3 — регулировочный резистор

ная на рис. 9.6 (генераторный режим при работе СД независимо от сети переменного тока). В этой схеме обмотки статора СД 2 отключаются от сети переменного тока и закорачиваются на добавочные резисторы 1 (или накоротко), а обмотка возбуждения остается подключенной к источнику возбуждения $U_{в}$ через резистор 3.

Механические характеристики СД при динамическом торможении аналогичны таковым для АД (см. подразд. 8.8).

Торможение противовключением СД используется редко, так как перевод СД в этот режим сопровождается значительными бросками тока и момента, требует токоограничения и применения сложных схем управления.

9.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для регулирования скорости СД на практике нашли два способа:

- 1) частотный;
- 2) в схеме вентильного двигателя.

Частотное регулирование основывается на формуле $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$ и аналогично реализации этого способа применительно к АД. Семейство искусственных механических характеристик представляет собой совокупность горизонтальных линий с различными ординатами.

Вентильным (ВД) называется синхронный двигатель с электронным коммутатором напряжения, к которому подключена обмотка статора, и датчиком положения ротора, установленным на валу двигателя и управляющим работой коммутатора в зависимости от положения ротора. Датчик положения ротора генерирует периодические сигналы, по которым открываются и закрываются ключи коммутатора, подключающего к сети соответствующие обмотки статора. В результате этого магнитное поле статора вращается с той же средней скоростью, что и ротор.

Недостатки двигателей постоянного тока, обусловленные наличием щеточно-коллекторного узла, а именно: недостаточная надежность, высокая стоимость изготовления и эксплуатации, недопустимость работы в пожаро- и взрывоопасных средах, привели к необходимости создания двигателя без коллектора и щеток. Известно, что эти элементы в машине постоянного тока выполняют функцию механического преобразователя тока: в генераторах — это выпрямитель, а в двигателях — инвертор.

Применение управляемых полупроводниковых приборов — тиристоров и транзисторов — позволило создать на этих элементах полупроводниковый коммутатор, способный заменить щеточно-коллекторный узел в машинах постоянного тока. Эти приборы работают в коммутаторе в режиме ключа, т. е. они имеют лишь два устойчивых положения: открытое для прохождения тока и закрытое.

В общем случае вентильная машина представляет собой соединение синхронной машины с полупроводниковым коммутатором.

Если вентильная машина работает в режиме *генератора*, то переменная ЭДС, индуцируемая в обмотке статора, посредством коммутатора преобразуется в постоянную ЭДС, т. е. в этом случае коммутатор является *выпрямителем*.

Если же вентильная машина работает в режиме *двигателя* и включена в сеть постоянного тока, то коммутатор выполняет роль *инвертора* — преобразователя постоянного тока сети в переменный ток обмотки статора. Что же касается свойств (характеристик) такого двигателя, то они зависят от способа управления полупроводниковыми элементами инвертора.

Если управление инвертором *независимое*, т. е. работа инвертора не связана с пространственным положением ротора двигателя, то вентильный двигатель по своим характеристикам в принципе не отличается от синхронного двигателя. В таком двигателе возможно применение частотного управления посредством управляемого автономного инвертора, включенного между питающей сетью и обмоткой статора синхронного двигателя.

Для получения вентильного двигателя со свойствами коллекторного двигателя постоянного тока, а это оказывается возможным лишь при *зависимом* управлении работой коммутатора, когда переход полупроводниковых элементов инвертора из открытого состояния в закрытое, и наоборот, происходит в зависимости от пространственного положения ротора двигателя. Такое управ-

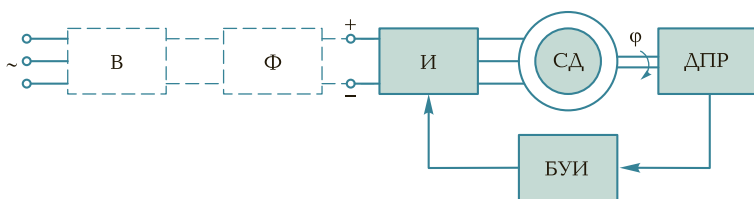


Рис. 9.7. Схема вентильного двигателя (пояснения приведены в тексте)

ление возможно лишь при наличии в двигателе датчика положения ротора ДПР.

Таким образом, процесс переключения тока в катушках обмотки статора вентильного двигателя происходит аналогично процессу коммутации в коллекторном двигателе постоянного тока.

На рис. 9.7 показана общая схема вентильного двигателя. Собственно двигатель (электромеханический преобразователь) — это синхронный двигатель СД, имеющий электромагнитное либо магнитоэлектрическое возбуждение.

В вентильных двигателях небольшой мощности преимущественное применение получило возбуждение постоянными магнитами, расположенными на роторе. Обмотка статора СД получает питание от электронного коммутатора, в качестве которого используется инвертор И, управляемый электрическими сигналами от ДПР через блок управления инвертором БУИ. При этом каждому положению ротора относительно пазовых сторон обмотки статора соответствует определенный сигнал на отпирание или запираание того или иного полупроводникового элемента — ключа инвертора И (транзистора или тиристора).

Таким образом, в вентильном двигателе применено *позиционное* управление инвертором И.

Собственно вентильный двигатель, питаемый постоянным током, включает лишь перечисленные элементы. Если же питание двигателя происходит от сети переменного тока, то схема дополняется выпрямителем В и фильтром Ф (на рис. 9.7 показаны пунктирными линиями).

На рис. 9.8 показана функциональная схема вентильного двигателя. Этот двигатель состоит из собственно двигателя М, представляющего собой синхронный двигатель с электромагнитным возбуждением, датчика положения ротора ДПР и инвертора И. Датчик положения ротора ДПР выдает сигналы на блок управления инвер-

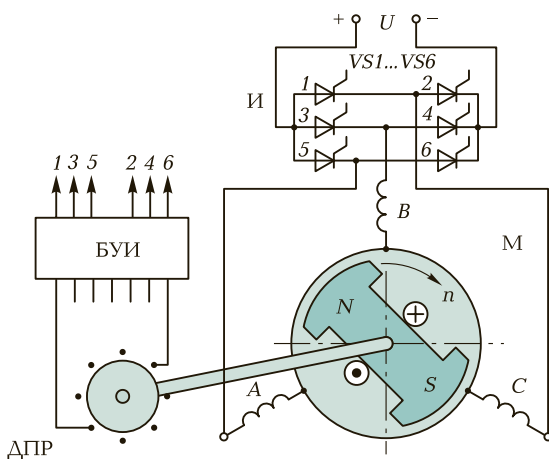


Рис. 9.8. Функциональная схема вентильного двигателя (пояснения приведены в тексте)

тором БУИ. Эти сигналы поступают на управляющие электроды тиристоров, вызывая их открывание в соответствии с пространственным положением ротора двигателя. Инвертор выполнен на шести тиристорах, соединенных по трехфазной мостовой схеме. Тиристоры 1, 3 и 5 образуют *анодную* группу, так как к ним подведен «плюс» напряжения питания U , а тиристоры 2, 4 и 6 образуют *катодную* группу — к ним подведен «минус» напряжения питания.

В современных вентильных двигателях обычно применяют инверторы, выполненные на биполярных транзисторах. В этом случае управляющие сигналы положительной полярности от ДПР через блок управления поступают на базу транзисторов. При поступлении такого сигнала транзистор открывается и при прекращении сигнала — запирается.

Отметим, что в рассмотренных вентильных двигателях датчик положения ротора ДПР совместно с полупроводниковым коммутатором выполняют функцию щеточно-коллекторного узла в традиционном (коллекторном) двигателе постоянного тока. Однако в отличие от последнего вентильный двигатель не имеет скользящих контактов, в нем не происходит сложных процессов коммутации, сопровождаемых искрением, «круговым огнем» и другими нежелательными последствиями, создающими взрыво- и пожароопасности и ограничивающими применение коллекторных двигателей постоянного тока.

9.5. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Исполнительные органы некоторых рабочих машин и механизмов должны совершать строго дозированные перемещения с фиксацией своего положения в конце движения. В ЭП таких машин и механизмов успешно применяются шаговые двигатели (ШД) различных типов, образующие основу дискретного ЭП.

Широкое распространение дискретного ЭП определяется еще и тем обстоятельством, что он естественным образом сочетается с цифровыми управляющими машинами, программными устройствами и микропроцессорами, которые все шире применяются во всех отраслях техники. Например, дискретный ЭП используется для металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), роботов и манипуляторов, в гибком автоматизированном производстве, в электронной и часовой промышленности и др.

ЭП с ШД в настоящее время используются на мощности от долей ватта до нескольких киловатт, что определяется мощностью серийно выпускаемых двигателей. Расширение шкалы мощности дискретных ЭП можно достигнуть, используя серийные АД, которые за счет соответствующего управления могут работать в шаговом режиме.

Шаговый двигатель по принципу своего действия аналогичен синхронному, но в отличие от последнего магнитное поле ШД перемещается (вращается) не непрерывно, а дискретно, шагами. Это достигается за счет импульсного возбуждения обмоток ШД с помощью электронного коммутатора, который преобразует одноканальную последовательность управляющих импульсов в многофазную систему напряжений, прикладываемых к его обмоткам (фазам).

Дискретному характеру напряжения на фазах ШД соответствует дискретное вращение (перемещение) электромагнитного поля в воздушном зазоре, вследствие чего движение ротора состоит из последовательных элементарных поворотов или шагов.

Принцип действия и виды ШД были рассмотрены в подразд. 3.7.

Управление ШД, как уже отмечалось, обеспечивается электронным блоком.

Современные блоки управления ШД состоят из нескольких функциональных узлов, выполняемых по различным схемам и с использованием разнообразных элементов. Стремление расширить область применения дискретного привода, повысить каче-

ния ШД содержат дополнительные узлы, с помощью которых характеристики ЭП улучшаются. К таким узлам относятся частотно-импульсный регулятор напряжения 11, усилитель обратной связи по току 10, блок электронного дробления шага 13, блок плавного разгона и торможения (задатчик интенсивности) 1, датчик положения ротора и скорости 7 и цифровой регулятор 6.

Регулятор 11 и усилитель 10, связанные с узлом сравнения 9, служат для автоматической стабилизации тока в обмотках ШД и поддержания его момента, что существенно улучшает энергетические показатели работы двигателя. Стабилизация тока осуществляется введением отрицательной обратной связи по току, с помощью которой за счет регулирования частоты переключения регулятора 11 (частотно-импульсная модуляция) изменяется среднее значение напряжения питания и тем самым регулируется ток в обмотках ШД.

Задача формирования тока в обмотках ШД решается также при использовании коммутатора 5, обладающего свойствами источника тока. В этом случае отпадает надобность в обратной связи по току и блоках 11 и 10.

Для улучшения качества движения ШД при низких частотах и повышения точности обработки входных импульсов управления с помощью блока 13 уменьшается единичный шаг ШД.

Улучшение динамических свойств дискретного ШД, в частности увеличение диапазона рабочих частот входного сигнала, значительно превышающих частоту приемистости двигателя, может быть достигнуто введением в схему блока 1, обеспечивающего разгон и торможение двигателя с заданным темпом, при котором еще не происходит пропуска управляющих импульсов. При использовании блока 1 область рабочих частот шагового электропривода может быть увеличена в 2...3 раза.

Возможности дискретного ЭП расширяются при использовании замкнутых схем управления на основе датчика 7 и регулятора 6. В таком дискретном приводе информация о действительном положении вала и скорости ШД поступает на вход цифрового регулятора 6, который обеспечивает заданный характер движения привода.

Перспективы дальнейшего развития ЭП с ШД связаны с использованием микропроцессорных средств управления. В этом случае функции всех показанных на рис. 9.9 блоков управления, за исключением силового коммутатора, датчиков скорости и положения, выполняет микропроцессор по соответствующей программе. Как говорят в таких случаях, аппаратная реализация схемы

управления ЩД заменяется более гибкой и функционально богатой — программной.

Область применения дискретного привода постоянно расширяется. Его используют кроме указанных ранее случаев в газорезательных и сварочных автоматах, часах, нажимных устройствах прокатных станков, лентопротяжных и регистрирующих устройствах, медицинской технике, производстве элементов микроэлектроники и др.

9.6. ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Все более широкое применение находит так называемый вентильно-индукторный электропривод (ВИП), основными достоинствами которого являются простота, технологичность, невысокая стоимость применяемого индукторного электродвигателя, сочетающиеся с широкими регулировочными возможностями. Мощность таких ЭП составляет от единиц до нескольких сотен киловатт и более.

Структурная схема силовой части ВИП в случае питания его от трехфазной сети переменного тока показана на рис. 9.10, а. В ее состав входят индукторный двигатель ИД, электронный коммутатор К, выпрямитель В, датчик положения ротора двигателя ДП и система управления СУ. Особенность ВИП состоит в применении индукторного двигателя с различным числом полюсов статора и зубцов на роторе (обычно в пределах 4... 12). На рисунке в качестве примера показан трехфазный двигатель, имеющий шесть полюсов статора и четыре зубца на роторе.

На полюсах статора ИД расположены три обмотки $A - a$, $B - b$, $C - c$, подключенные к электронному коммутатору, выполняемому обычно на силовых транзисторах того или иного типа. В качестве управляемых ключей коммутатора используются силовые биполярные транзисторы $VT1 \dots VT6$ с изолированным затвором типа IGBT. Управление ключами осуществляет схема управления СУ, обеспечивающая подачу на них импульсов управления с необходимыми последовательностью и частотой, которые определяются сигналами задания скорости $U_{з.с}$ и датчика положения $U_{д.п}$.

Принцип действия ВИП состоит в следующем. При подаче импульсов управления на пару транзисторов (ключей) одной фазы коммутатор подключает обмотку этой фазы двигателя к выходу

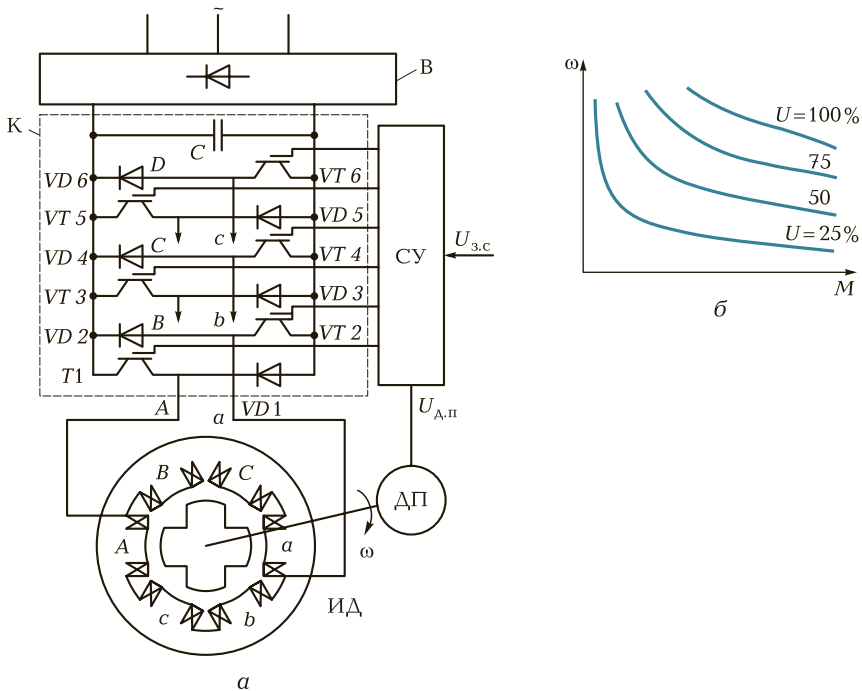


Рис. 9.10. Схема включения (а) и механические характеристики (б) ЭП с вентильно-индукторным двигателем

выпрямителя *B*. По обмотке начинает протекать ток, создающий в двигателе магнитное поле. Это магнитное поле вызывает появление электромагнитных сил притяжения между полюсами статора и ближайшими к ним зубцами ротора, которые и создают вращающий момент на валу двигателя. Под действием этого момента ротор перемещается в согласованное положение, в котором оси возбужденных полюсов статора и ближайших к ним зубцов ротора будут совпадать.

Так как число полюсов статора и зубцов ротора различно, то при согласованном положении ротора с работающей фазой следующая фаза оказывается в рассогласованном положении и подготовленной к очередному подключению к источнику питания. Требуемая последовательность подключения фаз двигателя к источнику питания, при которой на его валу обеспечивается постоянное направление вращающего момента, осуществляется с помощью находящегося на валу датчика положения.

Скорость вращения ротора определяется формулой

$$\omega = 2\pi f_k / (mn), \quad (9.2)$$

где f_k — частота коммутации обмоток; m — число фаз двигателя; n — число зубцов ротора.

Формула (9.2) показывает возможность выполнения ВИП с различными скоростями. При высокой частоте коммутации обмоток ИД имеют большие скорости вращения, а большое число полюсов статора и зубцов ротора определяет их низкие скорости. При низких скоростях ИД из кинематической схемы ВИП можно исключить редукторы.

Механические характеристики в разомкнутой структуре ВИП при различных напряжениях питания U показаны на рис. 9.10, б. С помощью различных обратных связей могут быть сформированы характеристики, обеспечивающие регулирование координат ЭП с требуемым качеством. В ВИП за счет выбора моментов включения и отключения обмоток двигателя может быть реализован и тормозной режим работы. На рис. 9.10, а диоды $VD1 \dots VD6$ служат для обеспечения возможности циркуляции электромагнитной мощности в ЭП при отключении силовых транзисторов, а конденсатор C играет роль фильтра на выходе выпрямителя.

В современных схемах ВИП широко используются микропроцессорные средства управления, позволяющие в ряде случаев отказаться от применения датчика положения, а необходимую для работы информацию о положении ротора получать косвенным путем. Это позволяет упростить кинематическую схему ВИП и сделать его более простым и надежным.

9.7. СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Релейно-контакторные схемы управления СД, кроме обычных операций включения и отключения двигателя и ограничения пусковых токов, должны обеспечивать его синхронизацию с сетью и управление возбуждением.

Электротехническая промышленность выпускает типовые панели и шкафы управления СД разных типов. Рассмотрим в качестве примера схему панели управления низковольтным СД серии ПУ 7502 (рис. 9.11), которая обеспечивает его прямой (без токоограничения) пуск с глухоподключенным возбудителем G , имеющим независимую НОВ и последовательную ПОВ обмотки воз-

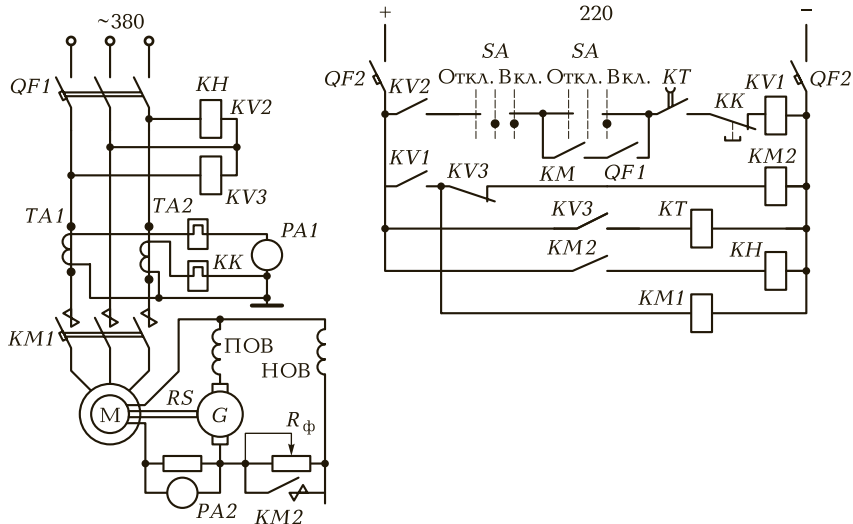


Рис. 9.11. Схема синхронного электропривода с использованием типовой панели управления

буждения, и форсировку возбуждения при снижении уровня питающего напряжения. В схеме предусмотрены также тепловая защита (реле *КК* и трансформаторы тока *ТА1* и *ТА2*), токовая (автоматы *QF1* и *QF2*) и защиты от снижения напряжения сетей переменного (реле *KV2*, *KV3*) и постоянного (реле *KV1*) токов.

Пуск СД возможен только при нормальных уровнях питающих схему напряжений постоянного и переменного токов. В этом случае, если рукоятка командоконтроллера *SA* находится в среднем положении и включены автоматы *QF1* и *QF2*, срабатывают реле напряжения *KV2*, *KV3* и реле времени *КТ*, подготавливая схему к пуску. При переводе рукоятки *SA* в положение «Вкл.» срабатывает реле *KV1* и катушка линейного контактора *КМ1* подключается к источнику питания, одновременно к обмотке статора СД подводится напряжение переменного тока и тот начинает разбег. При подсинхронной скорости происходит возбуждение возбудителя *Г* и соответственно двигателя, т. е. начинается процесс синхронизации его с сетью.

О включении контактора форсировки *КМ2* сигнализирует указательное реле *КН*. Для контроля тока статора в схеме предусмотрен амперметр *РА1*, а тока возбуждения — амперметр *РА2*, питаемый от шунта *RS*.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие достоинства присущи СД?
2. Что такое угловая характеристика СД?
3. В чем состоят особенности пуска СД?
4. Как включается обмотка возбуждения СД при пуске?
5. Как ограничиваются токи при пуске СД?
6. Что такое U-образные характеристики СД?
7. Каким образом происходит регулирование тока возбуждения СД?
8. Что такое вентильный двигатель?
9. Какие коммутаторы используются в ВД?
10. Поясните принцип действия шагового двигателя.
11. Какова схема управления ШД?
12. Назовите виды ШД и их особенности.
13. Назовите особенности вентильного ЭП с индукторным двигателем.

ЭНЕРГЕТИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

10.1. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Главное назначение ЭП заключается в обеспечении движения исполнительных органов рабочих машин и механизмов и управления этим движением. Однако необходимо учитывать, каковы при этом потребление и потери электроэнергии, как ЭП влияет на сеть и другие электроприемники. Оценка этих свойств ЭП осуществляется с помощью так называемых энергетических показателей, к числу которых относятся коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, потери мощности и энергии, а иногда и потребляемые из сети мощность и энергия.

Энергетические показатели широко используются как при создании новых, так и при оценке работы уже действующих ЭП. Очевидно, что предпочтительный ЭП, обеспечивая заданный технологический процесс рабочей машины или механизма, должен иметь более высокие по сравнению с другими энергетические показатели. Если эти показатели уже работающих ЭП оказываются существенно хуже номинальных, правомочна постановка вопроса о модернизации этих ЭП. Причем капитальные затраты на модернизацию должны сопоставляться с сокращением эксплуатационных расходов за счет повышения КПД и $\cos \varphi$.

В общем случае потери мощности и энергии в ЭП складываются из потерь в электродвигателе, механической передаче, силовом преобразователе и системе управления, однако основными являются потери в электродвигателе, которым далее и уделяется основное внимание.

Потери мощности ΔP в электродвигателе удобно представить суммой двух составляющих потерь — постоянных K и переменных V :

$$\Delta P = K + V. \quad (10.1)$$

Под постоянными подразумеваются потери мощности, не зависящие от нагрузки двигателя. К ним относятся потери в стали магнитопровода, механические потери от трения в подшипниках и вентиляционные потери. В СД и двигателе постоянного тока с независимым возбуждением к постоянным потерям обычно относят и потери в обмотках возбуждения.

Постоянные потери в действительности не являются неизменными, а зависят от скорости двигателя, амплитуды и частоты питающего его напряжения и ряда других факторов. Однако, поскольку эти потери изменяются незначительно, они обычно принимаются неизменными и равными номинальным.

Под переменными подразумеваются потери, выделяемые в обмотках двигателей при протекании по ним токов, определяемых механической нагрузкой ЭП. Переменные потери мощности в двигателе могут быть в общем случае определены через электрические или механические переменные и параметры.

В двигателях постоянного тока переменные потери мощности

$$V = I^2 R, \quad (10.2)$$

где I , R — соответственно ток и сопротивление цепи якоря двигателя.

В трехфазных асинхронных двигателях

$$V = V_1 + V_2 = 3I_1^2 R_1 + 3I_2^2 R_2', \quad (10.3)$$

где V_1 и V_2 — потери мощности соответственно в цепях обмоток статора и ротора. При использовании П-образной схемы замещения (см. рис. 8.2), когда по резистору R_1 протекает ток I_2 , потери в статоре

$$V_1 = 3I_1^2 R_1 = I_2^2 R_1 R_2' / R_2' = V_2 R_1 / R_2', \quad (10.4)$$

а полные переменные потери

$$V = 3I_2^2 (R_1 + R_2') = V_2 (1 + R_1 / R_2'). \quad (10.5)$$

В синхронных двигателях

$$V = 3I_1^2 R_1. \quad (10.6)$$

Потери мощности при работе двигателя в номинальном режиме определяются по его паспортным данным с помощью номинального КПД и номинальной мощности двигателя:

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} (1 - \eta_{\text{НОМ}}) / \eta_{\text{НОМ}}. \quad (10.7)$$

Постоянные потери мощности

$$K = \Delta P - V_{\text{ном}}. \quad (10.8)$$

Потери энергии в двигателе. За время работы t_p двигателя с постоянной нагрузкой полные потери энергии, обусловленные K и V ,

$$\Delta A = \Delta P t_p. \quad (10.9)$$

При работе двигателя с циклически изменяющейся нагрузкой полные потери энергии за весь цикл

$$\Delta A = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt \approx \sum_{i=1}^m \Delta P_i t_i, \quad (10.10)$$

где ΔP_i , t_i — потери мощности и время работы на i -м участке цикла; m — число отдельных участков цикла, $\sum_{i=1}^m t_i = t_{\text{ц}}$ — длительность цикла.

Приведенные ранее формулы позволяют выполнить расчет потерь мощности и энергии по токам и сопротивлениям цепей двигателей. Эти же потери могут быть рассчитаны и по механическим переменным и параметрам двигателей.

Переменные потери мощности, выделяющиеся в якоре двигателя постоянного тока и роторе асинхронного двигателя, могут быть также определены с помощью выражения (7.11) через механические переменные и параметры:

$$V = V_2 = M\omega_0\delta = M\omega_0s, \quad (10.11)$$

где $\delta = s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ — относительная скорость ДПТ или скольжение АД.

Переменные потери в статоре АД в соответствии с (10.4)

$$V_1 = V_2 R_1/R_2' = M\omega_0sR_1/R_2'. \quad (10.12)$$

Полные переменные потери в АД

$$V = V_1 + V_2 = M\omega_0s(1 + R_1/R_2'). \quad (10.13)$$

Формула (10.13) позволяет рассчитывать потери мощности в АД по известным моменту, скорости идеального холостого хода (скорости вращения магнитного поля), скольжению и отношению сопротивлений R_1 и R_2' .

Полные потери энергии в двигателях и в этом случае рассчитываются по (10.9) или (10.10).

Потери мощности и энергии в преобразователе. Являются электрическими и определяются по формулам (10.2) и (10.9). При использовании для управления двигателями полупроводниковых

преобразователей потери в них складываются из потерь в вентилях, трансформаторах, сглаживающих и уравнивающих реакторах, фильтрах и элементах устройств искусственной коммутации. Потери в полупроводниковых элементах преобразователей обычно относительно малы (несколько процентов от номинальной мощности).

При расчете потерь в трансформаторах и реакторах берется сопротивление их обмоток или эквивалентное сопротивление преобразователя, определяемое формулой (7.34).

Потери мощности в малоомощной системе управления. Обычно не превышают нескольких десятков ватт и принимаются во внимание только при выполнении точных энергетических расчетов.

Потери мощности в механической передаче. Определяются главным образом трением в движущихся частях и существенно зависят от передаваемого момента.

Потери в механической передаче обычно оцениваются с помощью КПД, значения которого для разных ее видов и нагрузок приводятся в справочной литературе.

Задача 10.1. АД типа 4АН160S4 имеет номинальные мощность $P_{\text{ном}} = 18,5$ кВт; скорость $n_{\text{ном}} = 1450$ мин⁻¹; ток статора $I_{1\text{ном}} = 36,5$ А; КПД $\eta_{\text{ном}} = 88\%$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,87$; $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}} = 1,3$; $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2,1$; $J = 0,37$ кг·м².

Рассчитать потери мощности в АД при его работе с моментом $M_c = 0,9M_{\text{ном}}$ на естественной характеристике, если соотношение $R_1/R_2' = 0,6$.

Так как режим работы задан моментом нагрузки, используем формулы для расчета потерь через механические координаты и параметры. Определяем скорости АД в номинальном режиме и при холостом ходе:

$$\omega_{\text{ном}} = 2\pi n_{\text{ном}}/60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1450/30 = 152 \text{ рад/с};$$

$$\omega_0 = 2\pi f_1/p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50/2 = 157 \text{ рад/с}.$$

Определяем номинальные скольжение и момент АД:

$$s_{\text{ном}} = (\omega_0 - \omega_{\text{ном}})/\omega_0 = (157 - 152)/157 = 0,033;$$

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/\omega_{\text{ном}} = 18500/152 = 122 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Принимая рабочий участок механической характеристики АД линейным, из (8.16) при $M_c = 0,9 M_{\text{ном}} = 0,9 \cdot 122 = 110$ Н·м находим

$$s_c = s_{\text{ном}} M_c/M_{\text{ном}} = 0,033 \cdot 0,9 = 0,03.$$

По формуле (10.13) определяем переменные потери мощности в заданной точке:

$$V = V_1 + V_2 = M\omega_0 s(1 + R_1/R_2') = 110 \cdot 157 \cdot 0,03(1 + 0,6) = 829 \text{ Вт}.$$

Находим по (10.7) полные потери АД в номинальном режиме:

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}})/\eta_{\text{ном}} = 18\,500(1 - 0,88)/0,88 = 2\,523 \text{ Вт.}$$

Переменные потери в номинальном режиме также находим по (10.13):

$$V_{\text{ном}} = M_{\text{ном}}\omega_0 s_{\text{ном}}(1 + R_1/R_2') = 122 \cdot 157 \cdot 0,033(1 + 0,6) = 1\,011 \text{ Вт.}$$

Постоянные потери в АД

$$K = \Delta P_{\text{ном}} - V_{\text{ном}} = 2\,523 - 1\,011 = 1\,512 \text{ Вт.}$$

10.2. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Возникающие при пуске, реверсе, торможении, изменении скорости и изменении нагрузки токи, как правило, превышают номинальный уровень. По этой причине выделяющиеся в двигателе и других элементах ЭП потери могут быть весьма значительными и существенно влиять на энергетические показатели его работы. Отметим также, что повышенные потери в двигателе вызывают его дополнительный нагрев, что подчеркивает важность правильной их оценки.

В общем случае потери энергии за время переходного процесса $t_{\text{п.п}}$ могут быть определены с помощью следующего выражения:

$$\Delta A = \int_0^{t_{\text{п.п}}} \Delta P dt = \int_0^{t_{\text{п.п}}} K dt + \int_0^{t_{\text{п.п}}} V dt = \Delta A_K + \Delta A_V, \quad (10.14)$$

где ΔA_K и ΔA_V — потери энергии, обусловленные соответственно постоянными и переменными потерями мощности.

Потери энергии ΔA_K легко можно найти в том случае, когда постоянные потери мощности K не изменяются за время переходного процесса:

$$\Delta A_K = K t_{\text{п.п}}. \quad (10.15)$$

Удобные расчетные соотношения для определения потерь энергии в переходных процессах получаются в том случае, если переменные потери мощности выражаются через механические переменные и параметры.

Потери энергии при работе ЭП без нагрузки ($M_c = 0$). Потери мощности в якоре ДПТ и роторе АД определяются по одной формуле (10.11) и поэтому переменные потери энергии в этих частях двигателей также определяются идентично:

$$\Delta A_{V0} = \Delta A_{20} = \int_0^{t_{п.п}} M\omega_0 s dt = \int_0^{t_{п.п}} M(\omega_0 - \omega) dt, \quad (10.16)$$

где $s = \delta = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ — скольжение или относительная скорость двигателей.

Исключим из (10.16) время как переменную, воспользовавшись для этого уравнением механического движения (5.16). При $M_c = 0$ с учетом (8.4) получим

$$dt = Jd\omega/M = -J\omega_0 ds/M. \quad (10.17)$$

Заменим в (10.16) dt согласно (10.17), изменив одновременно пределы интегрирования, т. е. начальному моменту времени переходного процесса $t = 0$ будет соответствовать скольжение $s = s_{нач}$, а конечному времени $t_{п.п}$ — скольжение $s = s_{кон}$. Тогда (10.16) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \Delta A_{20} &= \int_{s_{нач}}^{s_{кон}} M\omega_0 s (-J\omega_0 ds/M) = \\ &= -J\omega_0^2 \int_{s_{нач}}^{s_{кон}} s ds = J\omega_0^2 (s_{нач}^2 - s_{кон}^2)/2. \end{aligned} \quad (10.18)$$

Полученное выражение (10.18) удобно для определения потерь энергии, так как при его использовании не требуется знать зависимость изменения координат ЭП во времени, а необходимо лишь иметь параметры J , ω_0 и значения $s_{нач}$ и $s_{кон}$.

Определим с помощью (10.18), для примера, потери энергии в якоре ДПТ и роторе АД при их пуске, реверсе и торможении вхолостую.

При пуске двигателей $\omega_{нач} = 0$ и $\omega_{кон} = \omega_0$, поэтому $s_{нач} = 1$, $s_{кон} = 0$, в соответствии с чем

$$\Delta A_{20}^H = J\omega_0^2/2. \quad (10.19)$$

Выражение (10.18) определяет полные переменные потери энергии в ДПТ, т. е. $\Delta A_{20} = \Delta A_{V0}$.

Для определения полных переменных потерь энергии в АД необходимо найти еще потери в цепи статора. Для этого воспользуемся выражением (10.12), из которого следует, что

$$\Delta A_{10} = \Delta A_{20} R_1/R_2'. \quad (10.20)$$

Тогда полные потери энергии в АД

$$\Delta A_{V0} = \Delta A_{10} + \Delta A_{20} = J\omega_0^2(1 + R_1/R_2')(s_{нач}^2 - s_{кон}^2)/2. \quad (10.21)$$

Отметим, что потери энергии в роторе АД не зависят от его сопротивления, в то время как потери в статоре АД обратно пропорциональны его сопротивлению.

Потери энергии при работе ЭП с нагрузкой ($M \neq 0$). Для определения потерь энергии при работе двигателей под нагрузкой справедлива также исходная формула (10.16).

Для оценочных расчетов энергетических показателей выполняют упрощенный расчет потерь энергии, т.е. считают, что момент двигателя в переходных процессах не изменяется и равен некоторому среднему моменту M_{cp} , при котором продолжительность переходных процессов остается примерно той же самой, что и при реальном изменении момента двигателя. Для получения расчетной формулы используется исходная формула (10.16), в которой

$$dt = -J\omega_0 ds / (M_{cp} \pm M_c),$$

где знак «-» соответствует пуску, а знак «+» — торможению двигателя. Подставив dt в (10.17) и одновременно заменив пределы интегрирования и M на $M_{cp} = \text{const}$, получим следующее выражение:

$$\Delta A_{2н} = \Delta A_0 M_{cp} / (M_{cp} \pm M_c), \quad (10.22)$$

где M_{cp} — средний, неизменный за время переходного процесса момент двигателя.

Выражение (10.22) определяет потери энергии под нагрузкой в переходных процессах в роторе АД и якоре ДПТ. Для определения потерь в статоре $\Delta A_{1н}$ и полных потерь $\Delta A_{н}$ в АД используются формулы (10.20) и (10.21).

Задача 10.2. Определить переменные потери энергии в АД типа 4АН160S4 при пуске вхолостую и при номинальном моменте нагрузки (см. данные задачи 10.1).

При пуске вхолостую $s_{нач} = 1$, $s_{кон} = 0$. По формуле (10.21) определим переменные потери в двигателе:

$$\Delta A_{V0} = \Delta A_{10} + \Delta A_{20} = J\omega_0^2 (1 + R_1/R_2') (s_{нач}^2 - s_{кон}^2) / 2.$$

Для расчета потерь энергии при пуске под нагрузкой воспользуемся приближенной формулой (10.22). Средний момент двигателя при пуске примем равным половине суммы пускового и максимального (критического) моментов:

$$M_{cp} = (M_{пуск} + M_{max}) / 2 = (1,3M_{ном} + 2,1M_{ном}) / 2 = 122(1,3 + 2,1) / 2 = 207 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Потери при пуске с номинальной нагрузкой $M_c = M_{ном}$

$$\Delta A_{Vном} = \Delta A_{V0} M_{cp} / (M_{cp} - M_c) = 7\,296 \cdot 207 / (207 - 122) = 17\,685 \text{ Дж}.$$

10.3. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В общем случае, когда ЭП работает в некотором цикле с различными скоростями или нагрузками на валу как в установившемся, так и в переходном режимах, цикловой (или средневзвешенный) КПД

$$\eta_{ц} = A_{пол} / A_{потр} = A_{пол} / (A_{пол} + \Delta A) = \sum_1^n P_{полi} t_i / (\sum_1^n P_{полi} t_i + \sum_1^n \Delta P_i t_i), \quad (10.23)$$

где $A_{пол}$ и $A_{потр}$ — соответственно полезная механическая и потребленная электрическая энергия, ΔA — потери энергии; $P_{потr i}$ — полезная механическая мощность на i -м участке цикла; ΔP_i — потери мощности на i -м участке цикла; n — число участков работы ЭП.

Если ЭП работает в установившемся режиме, то формула (10.23) упрощается и принимает вид

$$\eta = P_{пол} / (P_{пол} + \Delta P). \quad (10.24)$$

КПД ЭП как электромеханической системы определяется произведением КПД преобразовательного устройства $\eta_{п}$, электродвигателя $\eta_{д}$ и механической передачи $\eta_{м.п.}$:

$$\eta = \eta_{п} \eta_{д} \eta_{м.п.} \quad (10.25)$$

Определив по формуле (10.23) КПД отдельных элементов ЭП, по (10.25) находят КПД ЭП в целом.

Определяющим в выражении (10.25) является КПД двигателя, который рассмотрим подробнее.

Рисунок 10.1, а иллюстрирует закономерность изменения номинального КПД электрических двигателей постоянного и переменного тока в зависимости от их номинальной мощности $P_{ном}$ и скорости $\omega_{ном}$. С ростом уровня номинальной мощности номинальный КПД растет, что объясняется уменьшением потерь мощности относительно полезной мощности двигателя. Двигатели с более высокой скоростью (кривые 1...3 соответственно $\omega_0 = 314$; 157; 105 рад/с) имеют при той же номинальной мощности более высокий номинальный КПД. Таким образом, более мощные и скоростные двигатели характеризуются и более высокими номинальными КПД.

КПД работающего двигателя зависит от развиваемой им полезной механической мощности на валу. При малых нагрузках КПД двигателя небольшой (рис. 10.1, б), по мере увеличения нагрузки

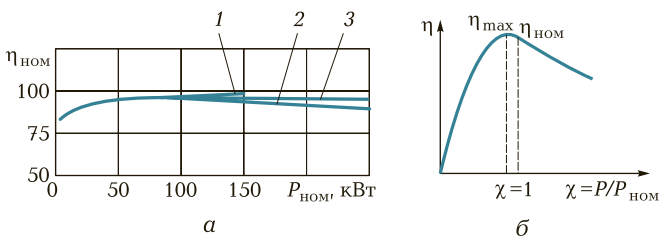


Рис. 10.1. Зависимости номинального КПД от номинальной мощности (а) и КПД от коэффициента нагрузки (б):

1...3 — кривые

он растет, достигая максимального значения η_{\max} при мощности, несколько меньшей номинальной.

Способы повышения КПД двигателей могут быть следующими: ограничение времени работы двигателя на холостом ходу; обеспечение нагрузки двигателя при работе, близкой к номинальной (в том числе путем замены малозагруженного двигателя на двигатель меньшей мощности, что необходимо обосновать экономически, т.е. капитальные затраты на замену должны окупиться за счет сокращения эксплуатационных расходов); применение регулятора экономичности (см. подразд. 8.4); снижение потерь энергии в переходных режимах. В регулируемых ЭП должны применяться способы, характеризующиеся малыми потерями мощности, например частотное регулирование скорости асинхронных и синхронных двигателей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите энергетические показатели ЭП.
2. Что входит в состав постоянных и переменных потерь мощности?
3. Как связаны между собой потери мощности и энергии?
4. Почему расчет потерь мощности и энергии в якоре ДПТ и роторе АД может быть выполнен по одной формуле?
5. Как упрощенно учитывается нагрузка ЭП при расчете потерь энергии в переходных процессах?
6. Какие существуют способы снижения потерь энергии в переходных процессах ЭП?
7. Что такое средневзвешенный КПД?
8. Каким образом можно повысить КПД ЭП?

ВЫБОР И ПРОВЕРКА ДВИГАТЕЛЕЙ

11.1. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ

При создании (проектировании) новых ЭП или модернизации уже существующих выбирают такие серийно выпускаемые двигатели, которые обеспечивали бы наилучшее выполнение возлагаемых на них функций и соответствовали бы условиям работы привода и рабочей машины. Их паспортные (номинальные) данные (мощность, напряжение, ток, частота и др.) должны быть близки к расчетным при работе данного ЭП, а конструктивное исполнение должно соответствовать способу его размещения и условиям окружающей среды.

Основным элементом любого ЭП является двигатель. Именно его данными определяется выбор других элементов — преобразователей, коммутационной аппаратуры, резисторов, элементов защиты и др. По этой причине расчету мощности и выбору двигателя в этой главе уделяется основное внимание.

Основным требованием при выборе электродвигателя является его соответствие условиям технологического процесса рабочей машины. Задача выбора состоит в поиске такого двигателя, который будет обеспечивать заданный технологический цикл рабочей машины, иметь конструкцию, соответствующую условиям эксплуатации и компоновки с рабочей машиной, а его нагрев при этом не должен превышать нормативный (допустимый) уровень.

Выбор двигателя недостаточной мощности может привести к нарушению заданного технологического цикла и снижению производительности рабочей машины. Происходящие при этом его повышенный нагрев и ускоренное старение изоляции определяют преждевременный выход самого двигателя из строя, останов рабочей машины и соответствующие экономические потери.

Недопустимым является также использование двигателей повышенной мощности, так как при этом, имея повышенную первоначальную стоимость, ЭП работает с низкими КПД и коэффициентом мощности.

Выбор электродвигателя производится обычно следующим образом: сначала рассчитывается требуемая мощность, а затем предварительно выбранный двигатель проверяется по условиям пуска, перегрузке и нагреву. Если он удовлетворяет условиям проверки, то на этом выбор заканчивается, если же не удовлетворяет, то выбирается другой двигатель (как правило, большей мощности) и проверка повторяется.

При проектировании вновь создаваемого ЭП одновременно с выбором двигателя должны производиться расчет передаточного числа (радиуса приведения) и выбор механической передачи между двигателем и исполнительным органом рабочей машины. В данной главе рассматривается более простая задача — выбор двигателя при известных механической передаче, ее передаточном числе (или радиусе приведения) и КПД.

Основой для расчета мощности и выбора электродвигателя являются нагрузочная диаграмма и диаграмма скорости (тахограмма) исполнительного органа рабочей машины.

Нагрузочная диаграмма исполнительного органа рабочей машины представляет собой график изменения приведенного к валу двигателя статического момента нагрузки во времени $M_c(t)$. Эта диаграмма рассчитывается на основании технологических данных, характеризующих работу машин и механизмов, и параметров механической передачи. Для примера приведем формулы, по которым можно рассчитать моменты сопротивления M_c , создаваемые на валу двигателя при работе исполнительных органов некоторых машин и механизмов.

При работе механизма *подъемной лебедки*

$$M_c = GR/(i\eta), \quad (11.1)$$

где G — сила тяжести поднимаемого груза, Н; R — радиус барабана подъемной лебедки, м; i, η — соответственно передаточное число и КПД механической передачи.

При работе механизма *перемещения подъемных кранов*

$$M_c = k_1 G\mu r + f/(i\eta), \quad (11.2)$$

где G — сила тяжести перемещаемой массы, Н; $k_1 = 1,8 \dots 2,5$ — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления движению из-за трения реборд ходовых колес о рельсы; $\mu = 0,015 \dots 0,15$ — ко-

коэффициент трения в опорах ходовых колес; $f = (5 \dots 12) \cdot 10^{-4}$ — коэффициент трения качения ходовых колес по рельсам, м; r — радиус шейки оси ходового колеса, м.

При работе *вентиляторов*

$$M_c = k_3 QH / (\eta_b \omega_b \eta_i), \quad (11.3)$$

где Q — производительность вентилятора, м³/с; H — напор (давление) газа, Па; $\eta_b = 0,4 \dots 0,85$ — КПД вентилятора; ω_b — скорость вентилятора, рад/с; $k_3 = 1,1 \dots 1,5$ — коэффициент запаса.

При работе *насосов*

$$M_c = k_3 g \rho Q (H_c + \Delta H) / (\eta_n \omega_n \eta_i), \quad (11.4)$$

где Q — производительность насоса, м³/с; H_c — статический напор, м; ΔH — потери напора в трубопроводе, м; $g = 9,81$ — ускорение свободного падения, м/с²; ρ — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; $k_3 = 1,1 \dots 1,3$ — коэффициент запаса; $\eta_n = 0,45 \dots 0,75$ — КПД насоса; ω_n — скорость насоса, рад/с.

Диаграмма скорости, или тахограмма, представляет собой зависимость скорости движения исполнительного органа от времени $v_{ио}(t)$ или $\omega_{ио}(t)$. После выполнения операции приведения эти зависимости изображаются в виде графика изменения скорости вала двигателя во времени $\omega(t)$.

На нагрузочной диаграмме, показанной на рис. 11.1, а, некоторый исполнительный орган создает при своей работе в течение времени t_1 момент нагрузки M_{c1} , а в течение времени t_2 — момент нагрузки M_{c2} . Из тахограммы (рис. 11.1, б) видно, что его движение состоит из участков разгона, движения с установившейся скоростью, торможения и паузы. Продолжительности этих участков соответственно равны t_p , t_y , t_T , t_0 , а полное время цикла $t_{ц} = t_p + t_y + t_T + t_0 = t_1 + t_2$.

Порядок расчета мощности, предварительного выбора и проверки двигателя рассмотрим на примере этих диаграмм.

Определение расчетной мощности двигателя. Ориентировочно расчетный момент двигателя

$$M_{расч} \geq k_3 M_{c.э}, \quad (11.5)$$

где $M_{c.э}$ — эквивалентный момент нагрузки; k_3 — коэффициент запаса, учитывающий динамические режимы электродвигателя, когда он работает с повышенными токами и моментами.

Если момент нагрузки M_c изменяется во времени и нагрузочная диаграмма имеет несколько участков, как это показано на рис. 11.1, а, то $M_{c.э}$ определяется как среднеквадратичная величина:

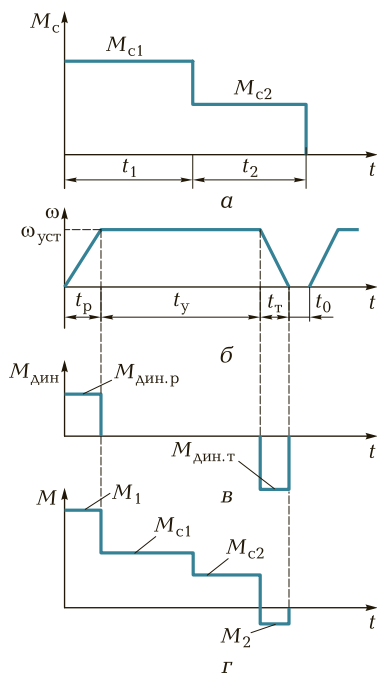


Рис. 11.1. К расчету мощности двигателя:

a — нагрузочная диаграмма исполнительного органа; *б* — тахограмма движения исполнительного органа; *в* — график динамического момента; *г* — нагрузочная диаграмма двигателя

$$M_{с.э} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_{ci}^2 t_i) / t_{ц}}, \quad (11.6)$$

где M_{ci} и t_i — соответственно момент и длительность i -го участка нагрузочной диаграммы.

Для рассматриваемого графика движения расчетная скорость двигателя $\omega_{расч} = \omega_{уст}$. Если скорость исполнительного органа регулируется, то расчетная скорость двигателя определяется более сложным путем и зависит от ее способа регулирования.

Расчетная мощность двигателя

$$P_{расч} = M_{расч} \omega_{расч} k_э M_{с.э} \omega_{уст}. \quad (11.7)$$

Выбор двигателя и проверка его по перегрузке и условиям пуска. По каталогу выбираем двигатель с ближайшими большими значениями мощности и скорости. Выбранный двигатель при этом

должен по роду и значению напряжения соответствовать параметрам сетей переменного или постоянного тока или силовых преобразователей, к которым он подключается; по конструктивному исполнению — условиям его компоновки с исполнительным органом и способам крепления на рабочей машине, а по способу вентиляции и защиты от действия окружающей среды — условиям его работы.

Выбранный двигатель проверяется по перегрузочной способности. Для этого рассчитывается зависимость его момента от времени $M(t)$, т. е. нагрузочная диаграмма двигателя. Она строится с помощью уравнения механического движения (5.15), записанного в виде

$$M = M_c + Jd\omega/dt = M_c + M_{\text{дин}}. \quad (11.8)$$

Динамический момент $M_{\text{дин}}$ определяется суммарным приведенным моментом инерции J и заданными ускорением на участке разгона и замедлением на участке торможения диаграммы скорости $\omega(t)$ (рис. 11.1, б). Если считать график $\omega(t)$ на участках разбега и торможения линейным, то динамические моменты на этих участках можно записать в следующем виде:

$$M_{\text{дин.р}} = J\Delta\omega/\Delta t = J\omega_{\text{уст}}/t_p = \text{const}; \quad (11.9)$$

$$M_{\text{дин.т}} = -J\omega_{\text{уст}}/t_t.$$

Зная график динамического момента (рис. 11.1, в) при постоянных ускорении и замедлении и зависимость $M(t)$, построенную на основании (11.8), сопоставим максимально допустимый момент двигателя M_{max} с максимальным моментом при разбеге M_1 (рис. 11.1, г). Для рассматриваемого случая должно выполняться соотношение

$$M_{\text{max}} \geq M_1. \quad (11.10)$$

Если соотношение (11.10) выполняется, то двигатель обеспечит заданное ускорение на участке разгона (рис. 11.1), если нет — график движения на этом участке будет отличаться от заданного и необходимо выбирать другой двигатель, если такой график скорости должен быть выполнен обязательно.

Для двигателя постоянного тока обычного исполнения и синхронного двигателя $M_{\text{max}} = M_{\text{доп}} = (1,5 \dots 2,5)M_{\text{ном}}$, для АД с фазным ротором этот момент может быть принят примерно равным критическому.

При выборе АД с короткозамкнутым ротором двигатель должен быть проверен также по условиям пуска, для чего сопо-

ставляется его пусковой момент $M_{\text{п}}$ с моментом нагрузки при пуске $M_{\text{с.п}}$:

$$M_{\text{п}} \geq M_{\text{с.п}}. \quad (11.11)$$

Для рассматриваемого примера $M_{\text{с.п}} = M_{\text{с1}}$. Если выбранный двигатель удовлетворяет рассмотренным условиям, то далее осуществляется его проверка по нагреву.

Задача 11.1*. Работа ЭП характеризуется рис. 11.1, а, б, при этом $M_{\text{с1}} = 40 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{\text{с2}} = 15 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $t_1 = 20 \text{ с}$; $t_2 = 60 \text{ с}$; $t_{\text{р}} = 2 \text{ с}$; $t_{\text{т}} = 1 \text{ с}$; $t_{\text{у}} = 77 \text{ с}$; $\omega_{\text{уст}} = 140 \text{ рад/с}$; $J = 0,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Определить расчетный момент и мощность двигателя и построить его нагрузочную диаграмму.

Расчетный момент двигателя определим по (11.5) с учетом (11.6), а расчетную мощность — по (11.7):

$$M_{\text{расч}} = k_3 M_{\text{с.э}} = 1,2 \sqrt{(40^2 \cdot 20 + 15^2 \cdot 60) / (20 + 60)} = 28,7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$P_{\text{расч}} = M_{\text{расч}} \omega_{\text{расч}} = 28,7 \cdot 140 = 4\,006 \text{ Вт} \approx 4 \text{ кВт}.$$

Для построения нагрузочной диаграммы двигателя $M(t)$ определим сначала динамические моменты на участках разбега $M_{\text{дин.р}}$ и торможения $M_{\text{дин.т}}$:

$$M_{\text{дин.р}} = J \omega_{\text{уст}} / t_{\text{р}} = 0,8 \cdot 140 / 2 = 56 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{дин.т}} = -J \omega_{\text{уст}} / t_{\text{т}} = -0,8 \cdot 140 / 1 = -112 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Моменты двигателя на участках разбега M_1 и торможения M_2 найдем по (11.8):

$$M_1 = M_{\text{с1}} + M_{\text{дин.р}} = 40 + 56 = 96 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_2 = M_{\text{с2}} + M_{\text{дин.т}} = 20 - 112 = -92 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Моменты двигателя на участках установившегося движения ($t_1 \dots t_{\text{р}}$) и ($t_2 \dots t_{\text{т}}$) равны моментам нагрузки $M_{\text{с1}}$ и $M_{\text{с2}}$, поскольку динамический момент на них равен нулю.

11.2. ПРОВЕРКА ДВИГАТЕЛЕЙ ПО НАГРЕВУ ПРЯМЫМ МЕТОДОМ

Электрический двигатель при работе может нагреваться лишь до определенной, допустимой температуры, определяемой в первую очередь нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов. Соблюдение установленных заводом-изготовителем ограничений по допустимой температуре нагрева, заложенных в паспортные данные двигателя, обеспечивает нормативный срок

его службы в пределах 15...20 лет. Превышение допустимой температуры ведет к преждевременному разрушению изоляции обмоток и сокращению срока службы электрических двигателей. Так, превышение допустимой температуры нагрева на 8...100 °С сокращает срок службы изоляции класса А вдвое.

В современных двигателях применяется изоляция нескольких классов, допустимая (нормативная) температура нагрева которой составляет: класса А — до 105 °С, Е — до 120 °С, В — до 130 °С, F — до 155 °С, Н — до 180 °С, С — свыше 180 °С.

В настоящее время при изготовлении электрических двигателей применяется в основном изоляция классов В, F и Н.

Сущность проверки двигателя по нагреву состоит в сопоставлении допустимой для него температуры с его температурой при работе. Очевидно, что если рабочая температура не превышает допустимую, то двигатель работает в допустимом тепловом режиме, и наоборот. Обычно оценивается не абсолютная температура, а так называемый перегрев τ , который представляет собой разность температур двигателя t и окружающей среды $t_{о.с.}$: $\tau = t - t_{о.с.}$

При выполнении тепловых расчетов берется стандартная температура окружающей среды, равная 40 °С, которой соответствует номинальная мощность двигателя, указанная на его щитке. При более низкой температуре окружающей среды двигатель может быть нагружен несколько выше номинальной мощности, а при более высокой температуре его нагрузка должна быть снижена или следует предпринять меры по дополнительному его охлаждению или замене на более мощный двигатель.

Двигатель будет работать в допустимом тепловом режиме при выполнении условия

$$\tau_{\text{раб}} < \tau_{\text{доп}}, \quad (11.12)$$

где $\tau_{\text{доп}}$ — допустимый (нормативный) перегрев двигателя, определяемый классом его изоляции; $\tau_{\text{раб}}$ — перегрев двигателя при работе.

В качестве $\tau_{\text{раб}}$ при проверке выбирается средний или максимальный за время (цикл) работы двигателя перегрев. При ориентировании на средний перегрев будет иметь место наиболее полное использование двигателя, хотя в некоторые периоды его работы перегрев будет превышать средний. Если же ориентироваться на максимальный перегрев, то рабочий перегрев двигателя всегда будет меньше нормативного, но при этом двигатель будет недоиспользован по своей мощности.

Проверка условия (11.12) может быть выполнена прямым или косвенными методами. Использование прямого метода предусматривает расчет и построение кривой перегрева $\tau(t)$ за цикл работы двигателя. По этой кривой непосредственно определяются максимальный или средний перегревы, которые сопоставляются с допустимыми, и на основании этого судят о тепловом режиме двигателя. При использовании косвенных методов о нагреве двигателя судят по тем или иным косвенным показателям — потерям мощности, эквивалентным току, моменту или мощности.

Для использования прямого метода необходимо иметь математическое описание (математическую модель) теплового режима двигателя. Точное описание процессов нагрева и охлаждения двигателей является очень сложной задачей. Двигатель представляет собой совокупность деталей и узлов различной конфигурации, выполненных из различных материалов, что обуславливает и их различные теплоемкости и теплопередачу. Неодинаковыми являются условия нагрева отдельных частей двигателя, а направление тепловых потоков зависит от режима его работы.

В связи с трудностью проведения точного анализа при исследовании тепловых процессов в двигателях обычно принимаются следующие допущения: двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее бесконечно большую теплопроводность и одинаковую температуру во всех своих точках; теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна первой степени разности температур двигателя и окружающей среды; окружающая среда обладает бесконечно большой теплоемкостью, т. е. в процессе нагрева двигателя ее температура не изменяется; теплоемкость двигателя и коэффициент его теплоотдачи не зависят от температуры. При этих условиях можно записать следующее исходное уравнение теплового баланса:

$$\Delta P dt = A \tau dt + C d\tau, \quad (11.13)$$

где ΔP — потери мощности в двигателе, Вт; A — теплоотдача двигателя, Дж/(с · °С); C — теплоемкость двигателя, Дж/°С.

Решение уравнения (11.13) имеет вид

$$\tau = (\tau_{\text{нач}} - \tau_{\text{уст}}) e^{-t/T_r} + \tau_{\text{уст}}, \quad (11.14)$$

где $\tau_{\text{уст}} = \Delta P/A$ — установившееся превышение температуры двигателя, °С; $T_r = C/A$ — тепловая постоянная времени нагрева или охлаждения двигателя, с; $\tau_{\text{нач}}$ — начальный перегрев двигателя, °С.

Выражение (11.14) может быть использовано для исследования теплового режима двигателя как при его нагреве, так и при охлаж-

дении. Необходимо лишь подставлять соответствующие значения $\tau_{\text{уст}}$, $\tau_{\text{нач}}$ и соответствующую тепловую постоянную времени T_T — нагрева T_H или охлаждения T_O .

По построенной таким образом кривой перегрева $\tau(t)$ находят его максимальное или среднее значение и проверяется выполнение условия (11.12).

11.3. ПРОВЕРКА ДВИГАТЕЛЕЙ ПО НАГРЕВУ КОСВЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Прямой метод проверки двигателей по нагреву имеет один существенный недостаток — для его использования необходимо знать тепловые параметры — теплоотдачу A и теплоемкость C . Так как в каталогах и справочниках по двигателям эти параметры обычно не указываются, то практическое использование прямого метода проверки оказывается затруднительным. В связи с этим в большинстве случаев проверка двигателей по нагреву осуществляется косвенными методами, не требующими построения графика $\tau(t)$. К их числу относятся методы средних потерь и эквивалентных величин.

Метод средних потерь. Является наиболее точным и универсальным из косвенных методов. Сущность этого метода заключается в определении средних потерь мощности за цикл работы двигателя и сопоставлении их с номинальными потерями мощности $\Delta P_{\text{ном}}$, после чего делается заключение о нагреве двигателя.

При использовании метода средних потерь рассматривается достаточно удаленный цикл работы двигателя, в котором средний перегрев его не изменяется.

Режим работы двигателя, в котором количество выделившегося в нем тепла за цикл равняется отданному в окружающую среду, называют квазиустановившимся. В этом режиме средний перегрев двигателя за время цикла $t_{\text{ц}}$ составляет

$$\tau_{\text{ср}} = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P dt / (A t_{\text{ц}}) = \Delta P_{\text{ср}} / A, \quad (11.15)$$

где $\Delta P_{\text{ср}} = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P dt / t_{\text{ц}}$ — средние потери мощности за цикл.

Итак, в соответствии с (11.15) средние потери за цикл определяют средний перегрев двигателя $\tau_{\text{ср}}$. По аналогии номинальные

потери мощности в двигателе определяют его допустимый (нормативный) нагрев $\tau_{\text{доп}}$, т. е. $\tau_{\text{доп}} = \Delta P_{\text{ном}}/A$.

С учетом (11.15) допустимый нагрев двигателя будет при условии

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{ном}}, \quad (11.16)$$

которое и является основным расчетным соотношением метода средних потерь.

В том случае, когда на отдельных участках цикла нагрузка постоянна, средние потери определяются по формуле

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\sum_1^n \Delta P_i t_i}{\sum_1^n t_i}. \quad (11.17)$$

Номинальные потери мощности двигателя определяются по каталожным данным по формуле

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}})\eta_{\text{ном}}. \quad (11.18)$$

Метод средних потерь позволяет оценить тепловой режим работы двигателя по среднему превышению температуры. В этом заключается определенная погрешность метода, поскольку максимальный перегрев двигателя на отдельных участках цикла может превышать $\tau_{\text{ср}}$. Точность оценки нагрева этим методом тем выше, чем больше постоянная нагрева двигателя $T_{\text{н}}$ превышает значение t_{max} наиболее продолжительного участка цикла работы двигателя, т. е. в случае выполнения неравенства $t_{\text{max}} < T_{\text{н}}$. При этом $\tau_{\text{ср}} \approx \tau_{\text{max}}$.

Методы эквивалентных величин. Основываются на методе средних потерь.

Метод эквивалентного тока целесообразно использовать в том случае, когда известен график изменения тока двигателя во времени, который может быть получен расчетным путем или экспериментально.

Условие проверки двигателя по нагреву (11.16) после некоторых преобразований будет иметь вид

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i^2 t_i)}{t_{\text{ц}}}} = I_{\text{экв}} \leq I_{\text{ном}}. \quad (11.19)$$

Ток $I_{\text{экв}}$ эквивалентен по условиям нагрева действительному изменяющемуся во времени току двигателя.

Итак, в соответствии с формулой (11.19) средний нагрев двигателя не будет превосходить допустимого (нормативного) уровня, если эквивалентный ток за цикл его работы не будет превосходить номинального (паспортного) тока.

Формула (11.19) справедлива, если постоянные потери не изменяются за цикл работы, а сопротивления главных цепей двигателя остаются неизменными в цикле работы. Следовательно, если постоянные потери или сопротивление главных цепей двигателя изменяются, то метод эквивалентного тока даст погрешность в оценке теплового состояния двигателя.

Метод эквивалентного момента удобно использовать в том случае, когда известен график изменения момента двигателя во времени $M(t)$. В дополнение к указанным условиям применения метода эквивалентного тока при использовании метода эквивалентного момента должно соблюдаться еще одно условие — постоянство магнитного потока двигателя на протяжении всего цикла работы.

Если это условие выполняется, то умножив обе части выражения (11.19) на $k\Phi_{\text{НОМ}}$, получим следующую формулу:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i^2 t_i) / t_{\text{ц}}} = M_{\text{ЭКВ}} \leq M_{\text{НОМ}}, \quad (11.20)$$

где $M_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентный по условиям нагрева среднеквадратичный момент двигателя за рабочий цикл.

Метод эквивалентной мощности используется, если известен график изменения мощности во времени, и при условии постоянства постоянных потерь, магнитного потока и скорости двигателя на всех участках рабочего цикла.

Допустим, что скорость двигателя на всех участках цикла равна номинальной. Умножив обе части соотношения (11.20) на $\omega_{\text{НОМ}}$, получим

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i^2 t_i) / t_{\text{ц}}} = M_{\text{ЭКВ}} \omega_{\text{НОМ}} = P_{\text{ЭКВ}} \leq P_{\text{НОМ}}, \quad (11.21)$$

где $P_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентная по условиям нагрева мощность, определяемая как среднеквадратичная механическая мощность двигателя за рабочий цикл.

Если выполняется соотношение (11.21), то при соблюдении указанных ранее условий нагрев двигателя не превысит допустимого уровня.

Особенности проверки двигателей по нагреву косвенными методами при различных режимах их работы рассмотрены в [10].

Задача 11.2. ДПТ типа 2ПФ 200 имеет следующие паспортные данные: $P_{\text{НОМ}} = 30$ кВт; $n_{\text{НОМ}} = 2200$ мин⁻¹; $I_{\text{НОМ}} = 74$ А; $U_{\text{НОМ}} = 440$ В; $\eta_{\text{НОМ}} = 90$ %.

Оценить тепловой режим двигателя при его работе по следующему циклу: время первого участка $t_1 = 12$ мин, момент нагрузки $M_{c1} = 120$ Н·м; время второго участка $t_2 = 25$ мин, момент нагрузки $M_{c2} = 145$ Н·м; время третьего участка $t_3 = 18$ мин, момент нагрузки $M_{c3} = 100$ Н·м. Ток возбуждения и сопротивление якорной цепи не изменяются. Заданный цикл отнесется к продолжительному режиму работы с переменной нагрузкой.

Так как ток возбуждения и сопротивление цепи якоря не изменяются, то для проверки двигателя по нагреву можно воспользоваться методом эквивалентного момента.

Определим номинальные угловую скорость и момент двигателя:

$$\omega_{\text{ном}} = \pi n_{\text{ном}} / 30 = 3,14 \cdot 2200 / 30 = 230 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}} = 30000 / 230 = 130,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Рассчитаем по (11.21) эквивалентный среднеквадратичный момент нагрузки двигателя:

$$M_{\text{экр}} = \sqrt{\sum_1^3 (M_i^2 t_i) / t_{\text{ц}}} = \\ = \sqrt{(120^2 \cdot 12 + 145^2 \cdot 25 + 100^2 \cdot 18) / (12 + 25 + 18)} = 126,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Сопоставим рассчитанный эквивалентный момент $M_{\text{экр}}$ с номинальным. Так как $M_{\text{экр}} = 126,4 \text{ Н} \cdot \text{м} < M_{\text{ном}} = 130,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$, то двигатель не будет перегреваться выше допустимого уровня.

Задача 11.3. АД краново-металлургической серии типа МТКВ 511-8 имеет номинальные мощность $P_{\text{ном}} = 28$ кВт при $\text{ПВ}_{\text{ном}} = 25\%$ и скорость $n_{\text{ном}} = 700$ мин⁻¹. Оценить нагрев двигателя, если он будет периодически включаться на 3 мин и преодолевать при этом момент нагрузки $M_c = 350$ Н·м, после чего будет отключаться на 5 мин. Данный цикл работы отнесется к повторно-кратковременному режиму.

Определим номинальную угловую скорость и номинальный момент при $\text{ПВ}_{\text{ном}}$ двигателя:

$$\omega_{\text{ном}} = \pi n_{\text{ном}} / 30 = 3,14 \cdot 700 / 30 = 73,3 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}} = 28000 / 73,3 = 382 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Найдем продолжительность включения двигателя в цикле:

$$\text{ПВ}_1 = t_p / (t_p + t_o) 100\% = 3 / (3 + 5) 100\% = 37,5\%.$$

Вычислим момент нагрузки при стандартной $\text{ПВ}_{\text{ном}} = 25\%$:

$$M_{\text{экр}} = M_c \sqrt{\text{ПВ}_1 / \text{ПВ}_{\text{ном}}} = 350 \sqrt{37,5 / 25} = 429 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Сопоставим приведенные к одной стандартной ($\text{ПВ}_{\text{ном}} = 25\%$) $M_{\text{экр}}$ и $M_{\text{ном}}$. Так как $M_{\text{экр}} = 429 \text{ Н} \cdot \text{м} > M_{\text{ном}} = 382 \text{ Н} \cdot \text{м}$, двигатель при работе в таком цикле будет перегреваться сверх допустимого уровня.

Задача 11.4. Для условий задачи 11.2 выполнить проверку двигателя по нагреву методами средних потерь и эквивалентного тока.

Задача 11.5. Для условий задачи 11.3 при тех же паузе и моменте нагрузки определить время работы двигателя, при котором перегрев двигателя не будет превосходить допустимого уровня.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается задача выбора двигателя?
2. На основании каких исходных данных производится расчет мощности двигателя?
3. Что такое нагрузочная диаграмма двигателя?
4. В чем сущность проверки двигателя по перегрузке и условиям пуска?
5. В чем сущность проверки двигателя по нагреву?
6. На чем основывается прямой метод проверки двигателя по нагреву?
7. Что такое метод средних потерь?
8. В чем сущность методов эквивалентных величин?

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ИСПОЛНЕНИЯ

12.1. СЛЕДЯЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Следящим называется ЭП, который обеспечивает (воспроизводит) с заданной точностью движение исполнительного органа рабочей машины в соответствии с произвольно изменяющимся входным сигналом управления. Этот механический или электрический сигнал может изменяться в широких пределах по произвольному временному закону. Чаще всего он соответствует скорости или углу поворота оси или вала задающего устройства. Следящий ЭП применяется в антеннах радиотелескопов, системах спутниковой связи, металлообрабатывающих станках, приводах роботов и манипуляторов, автоматических измерительных приборах и других устройствах.

Следящий ЭП (рис. 12.1) состоит из датчиков входного 1 и выходного 5 сигналов, измерителя рассогласования 2, системы управления 3 и электродвигателя 4 с механической передачей, которая приводит в движение исполнительный орган 6 рабочей машины.

Входной и выходной датчики преобразуют механические величины (скорость или угол поворота вала) в электрические — вход-

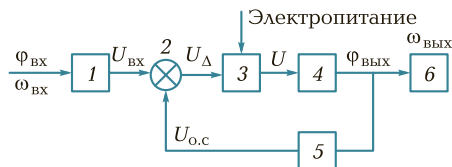


Рис. 12.1. Схема следящего электропривода:

1 — датчик входного сигнала; 2 — измеритель рассогласования; 3 — система управления; 4 — электродвигатель с механической передачей; 5 — датчик выходного сигнала; 6 — исполнительный орган рабочей машины

ной сигнал $U_{вх}$ и сигнал обратной связи $U_{о.с.}$. Измеритель рассогласования 2, алгебраически суммируя эти сигналы, вырабатывает сигнал рассогласования U_{Δ} , поступающий в систему управления электродвигателем 3. Следящий ЭП представляет собой замкнутую структуру, действующую по принципу отклонения.

Система управления 3 состоит из регулятора (усилителя) и силового преобразователя, которые обеспечивают необходимое преобразование сигнала рассогласования U_{Δ} в напряжение U , поступающее на двигатель. За счет выбора схем регулятора и преобразователя или введения корректирующих устройств обеспечивается необходимый закон изменения этого напряжения во времени $U(t)$ при отработке входного воздействия $\omega_{вх}(t)$ или $\varphi_{вх}(t)$.

Электродвигатель 4 с механической передачей в соответствии с законом изменения $U(t)$ обеспечивает перемещение исполнительного органа 6. Иногда двигатель с механической передачей называют исполнительным механизмом (сервомеханизмом).

Классифицируются следящие ЭП по нескольким признакам: если он предназначен для воспроизведения с заданной точностью скорости движения исполнительного органа, то называется скоростным, а если положения — то позиционным.

Различают также следящие ЭП с непрерывным или прерывным управлением; последние, в свою очередь, могут быть релейными и импульсными. В следящих ЭП непрерывного действия напряжение, пропорциональное сигналу рассогласования, постоянно подается на двигатель. В следящих ЭП релейного действия напряжение на двигатель подается только в том случае, когда сигнал рассогласования достигает определенного значения. Поэтому релейный следящий ЭП имеет определенную зону нечувствительности по отношению к входному сигналу. Импульсный следящий ЭП отличается тем, что его управляющее воздействие на двигатель подается в виде импульсов напряжения, амплитуда, частота или заполнение которых изменяются в зависимости от сигнала рассогласования. В этих случаях говорят соответственно об амплитудно-, частотно- и широтно-импульсной модуляции сигнала управления.

В следящих ЭП используются двигатели переменного и постоянного тока, различные виды усилителей (электромашинные, магнитные, полупроводниковые, пневматические, гидравлические), датчики скорости и положения и другие аналоговые и цифровые устройства управления.

Следящий ЭП переменного тока пропорционального действия. В следящих ЭП широкое применение находят АД, которые отли-

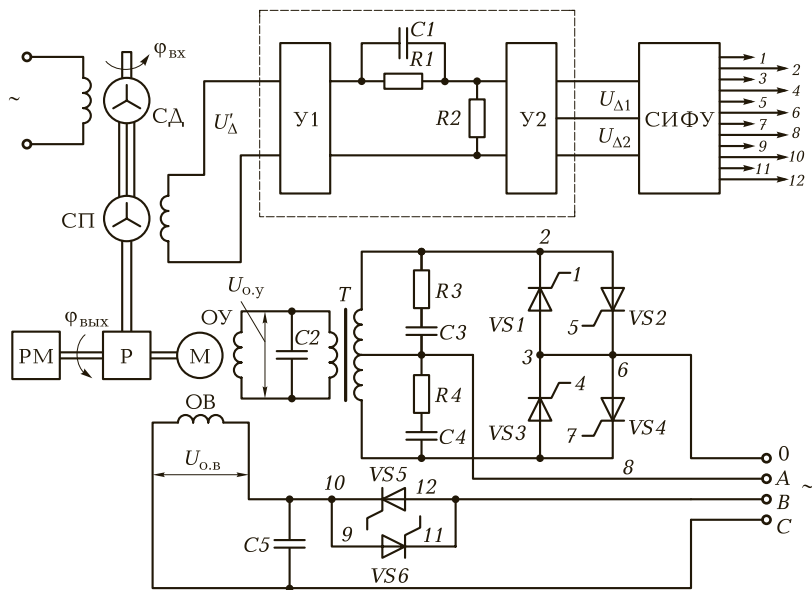


Рис. 12.2. Схема следящего электропривода с асинхронным двигателем

чаются надежностью в работе и долговечностью. При создании маломощных (до 1 кВт) следящих ЭП обычно пользуются двухфазные короткозамкнутые АД, в том числе и с полым ротором (рис. 12.2).

Двигатель М имеет обмотки возбуждения ОВ и управления ОУ, которые питаются сдвинутыми по фазе на 90° напряжениями. Регулирование скорости АД осуществляется изменением действующего значения напряжения на ОУ, которая получает питание от фазы А трехфазной сети переменного тока через тиристоры $VS1 \dots VS4$. Обмотка возбуждения ОВ связана с фазами В и С через тиристоры $VS5$ и $VS6$. Тиристоры $VS1 \dots VS6$ образуют стандартные схемы регуляторов напряжения переменного тока. Они попарно включены по встречно-параллельной схеме, что обеспечивает протекание тока по обмоткам в оба полупериода питающего напряжения.

Рассогласование между задающей осью и валом ЭП измеряется с помощью сельсинной пары, состоящей из сельсина-датчика СА и сельсина-приемника СП. Положение ротора СА определяет входной сигнал $\varphi_{\text{ВХ}}$, а положение ротора СП зависит от угла поворота вала электропривода $\varphi_{\text{ВЫХ}}$. Сигнал рассогласования U'_Δ снима-

емый с обмотки статора СП, пропорционален разности углов $\varphi_{\text{вх}}$ и $\varphi_{\text{вых}}$, а фаза этого напряжения определяется знаком этой разности (ошибки).

Сигнал рассогласования U'_Δ подается на вход фазочувствительного усилителя У1. После прохождения через корректирующее звено, состоящее из резисторов $R1, R2$ и конденсатора $C1$, сигнал рассогласования усиливается усилителем У2 и в виде напряжений $U_{\Delta1}$ или $U_{\Delta2}$ поступает на блок управления тиристорами.

Схема работает следующим образом. При появлении сигнала рассогласования U'_Δ в зависимости от его фазы на выходе усилителя У2 появляются напряжения $U_{\Delta1}$ или $U_{\Delta2}$. При возникновении, например, напряжения $U_{\Delta1}$ СИФУ подает импульсы управления на тиристоры $VS1, VS2, VS5, VS6$, которые открываются и подают на ОУ и ОВ напряжения $U_{о,у}$ и $U_{о,в}$, пропорциональные сигналу рассогласования $U_{\Delta1}$. Двигатель М начинает вращаться, уменьшая угол рассогласования $\Delta\varphi = \varphi_{\text{вх}} - \varphi_{\text{вых}}$ между осями сельсинов СД и СП.

При другой фазе сигнала U'_Δ , т.е. при изменении знака угла рассогласования, на выходе усилителя У2 появляется напряжение $U_{\Delta2}$. Этот сигнал включает тиристоры $VS3, VS4$, и на обмотку управления ОУ подается напряжение $U_{о,у}$, сдвинутое по фазе на 180° по сравнению с предыдущим случаем. Поскольку одновременно с этим откроются тиристоры $VS5, VS6$ и ОВ также получит питание, двигатель М начнет вращаться, но уже в другом направлении. Таким образом, за счет изменения фазы напряжения $U_{о,у}$ осуществляется реверс двигателя М, обеспечивающий отработку угла рассогласования с любым знаком.

Конденсаторы $C2...C5$ и резисторы $R3, R4$ служат для сглаживания пульсаций напряжения на обмотках двигателя.

Цифроаналоговый позиционный следящий ЭП постоянного тока. При необходимости получения высокой точности слежения (до 0,001 %) в современных ЭП применяются цифровые датчики координат, которые вместе с другими цифровыми устройствами управления (задатчиками, сумматорами, счетчиками и др.) образуют измерительную часть следящей системы. Высокая точность слежения обеспечивается в том случае, когда цифровая измерительная часть ЭП сочетается с аналоговой частью, выполненной по принципу подчиненного регулирования координат. В результате такого соединения образуются так называемые цифроаналоговые схемы ЭП, сочетающие в себе положительные свойства цифровых и аналоговых систем.

Аналоговая часть таких ЭП (рис. 12.3) выполняется по схеме подчиненного регулирования координат, в которой внешний кон-

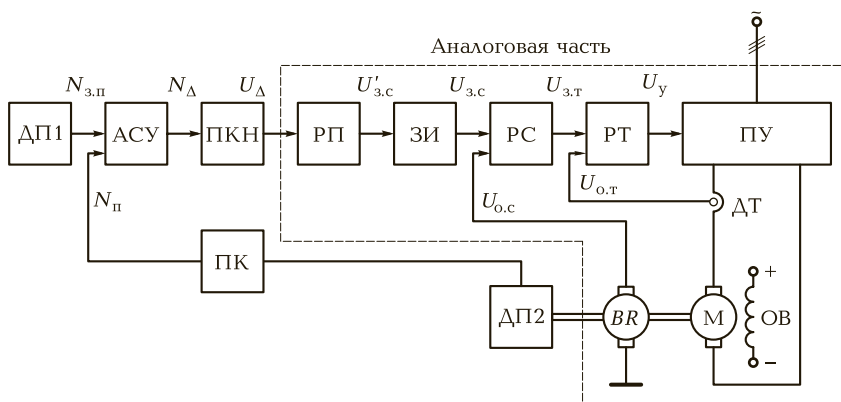


Рис. 12.3. Схема цифроаналогового следящего электропривода

тур регулирования положения цифровой, а внутренние контуры регулирования тока и скорости — аналоговые. Аналоговая часть состоит из регулятора тока РТ, на который поступают сигналы задания по току $U_{з.т}$ и обратной связи по току $U_{о.т}$, подаваемые соответственно с регулятора скорости РС и датчика тока ДТ. Выходной сигнал регулятора тока U_y является управляющим для реверсивного преобразователя ПУ, питающего якорь ДПТ независимого возбуждения М. Регулятор скорости РС, в свою очередь, получает сигнал $U_{о.с}$ от датчика скорости (тахогенератора) BR и сигнал $U_{з.с}$ от задатчика интенсивности ЗИ, входным сигналом которого является выходной сигнал $U'_{з.с}$ аналогового регулятора положения РП.

В состав цифровой измерительной части ЭП, формирующей сигнал рассогласования U_{Δ} , входят датчики входной ДП1 и выходной ДП2 координат ЭП (его положения), арифметическое суммирующее устройство АСУ, преобразователь кода в напряжение ПКН (преобразователь код—аналог) и преобразователь кода положения вала ДПТ в двоичный код ПК.

Работа цифровой части следящего ЭП происходит следующим образом. Требуемое перемещение ИО рабочей машины вырабатывается задатчиком ДП1 в виде числа $N_{з.п}$ в двоичном коде. Этот сигнал подается на вход сумматора АСУ вместе с числовым сигналом $N_{п}$ (также в двоичном коде), соответствующим действительному положению исполнительного органа рабочей машины. Сумматор суммирует эти два цифровых сигнала и выделяет сигнал рассогласования (ошибки) в цифровом коде N_{Δ} , который с помощью преобразователя ПКН преобразуется в аналоговый сигнал U_{Δ} (на-

пряжение постоянного тока), поступающий на вход регулятора положения РП.

12.2. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Электропривод с программным управлением обеспечивает движение исполнительного органа рабочей машины по определенной, наперед заданной программе. Чаще всего ЭП с таким управлением применяется при обработке деталей на металлообрабатывающих станках. При использовании программного управления перед обработкой детали составляется программа, задающая порядок смены инструмента, необходимые перемещения рабочего стола с креплением, режимы работы инструментов и другие технологические данные, которая затем реализуется ЭП исполнительных органов станка.

Применение ЧПУ позволяет увеличить производительность станков, сократить сроки подготовки производства и технологической оснастки при смене детали, уменьшить брак, перейти к многостаночному обслуживанию, обеспечить взаимозаменяемость, что в результате позволяет получить значительный экономический эффект. Использование ЧПУ особенно эффективно при мелкосерийном производстве и частой смене номенклатуры обрабатываемых деталей.

Обобщенная структура ЭП с ЧПУ приведена на рис. 12.4. От программного устройства ПУ сигнал управления U_n поступает на ЭП, который обеспечивает отработку этого сигнала, перемещая соответствующим образом исполнительный орган ИО. Совокупность программного устройства и ЭП называют системой программного управления СПУ. В этом случае могут использоваться все рассмотренные ранее виды ЭП постоянного и переменного тока.

Все существующие программные устройства делятся на нечисловые (цикловые) и числовые.

Электроприводы с нечисловыми (цикловыми) программными устройствами используются для обеспечения повторяющихся

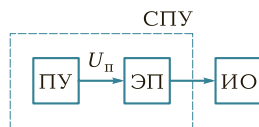


Рис. 12.4. Схема электропривода с программным управлением

одинаковых циклов движения исполнительных органов. В программных устройствах таких электроприводов применяются различные контактные и бесконтактные аппараты релейного действия — конечные и путевые выключатели, шаговые искатели, счетчики, средства программируемой логики. К электроприводам с нечисловыми программными устройствами относятся также системы с использованием шаблонов и копиров, которые применяются в различных копировальных станках и автоматах. В таких системах обычно используется следящий электропривод релейного действия.

Электропривод с числовым программным управлением (ЧПУ). При использовании ЭП с ЧПУ все технологические данные по обработке изделий — скорость и перемещение изделий или обрабатывающего инструмента, их направление, последовательность операций при обработке и другие — задаются в виде чисел. Совокупность этих чисел образует программу обработки данного изделия, предварительно рассчитанную, закодированную, записанную на тот или иной программный носитель (перфоленду). Перед обработкой изделия программа вводится в программное устройство ЭП, которое в дальнейшем обеспечивает обработку изделия без непосредственного участия рабочего. Для обработки другого изделия требуется лишь сменить программу, что значительно сокращает время обработки за счет исключения вспомогательных операций (подвода и отвода инструмента, измерения детали, установки подачи и скорости резания и др.).

Системы ЧПУ подразделяются на аналоговые (непрерывные) и дискретные (импульсные). В аналоговых системах ЧПУ совокупность чисел, образующих программу обработки изделия, преобразуется в какую-либо непрерывно изменяющуюся аналоговую физическую величину (напряжение постоянного тока, фазу или амплитуду синусоидального напряжения и др.), которая и является входным управляющим воздействием на ЭП. В дискретных системах ЧПУ программа в конечном итоге представляется последовательностью управляющих импульсов, каждому из которых соответствует определенное перемещение инструмента или изделия. Число импульсов определяет значение перемещения, а их частота — скорость.

Системы ЧПУ работают в двух режимах: позиционирования или контурной обработки. Позиционные (координатные) системы ЧПУ обеспечивают точную установку инструмента относительно изделия или их прямолинейное перемещение. Такие режимы бывают необходимы при фрезеровании, сверлении или расточке не-

скольких отверстий, а также при точении и строгании изделий. Инструмент или изделие в этом случае перемещается по кратчайшему прямолинейному пути между точками установки (позициями) инструмента. Контурные (функциональные) системы ЧПУ обеспечивают перемещение инструмента или изделия по произвольным траекториям, что требуется при контурной обработке изделий различной конфигурации.

Системы ЧПУ могут быть замкнутыми и разомкнутыми. В замкнутых системах с помощью датчиков измеряется действительное положение инструмента или изделия и эта информация в виде сигнала обратной связи подается в сравнивающее устройство, где она сопоставляется с сигналами программного устройства. При отличии действительного положения от заданного в систему управления ЭП поступают дополнительные управляющие сигналы, обеспечивающие необходимую коррекцию положения инструмента или изделия, а значит, большую точность обработки изделий.

В разомкнутых системах ЧПУ движение инструмента или изделия не контролируется и непосредственно не сопоставляется с заданным. Поэтому случайное изменение параметров системы или какие-либо внешние возмущения, например изменение момента сопротивления на валу привода, вызывают снижение точности отработки программы. Вместе с тем разомкнутые системы проще замкнутых в наладке и эксплуатации.

Процессу обработки изделия на станке с системой ЧПУ предшествует подготовка программносителя, которая состоит из нескольких этапов.

Исходными данными для составления программы обработки изделия являются технологические данные: размеры заготовки, чертеж изделия, материал заготовки, характеристика инструмента, необходимая степень точности изготовления изделия, характер и вид обработки.

Подготовленный программноситель ПН, содержащий программу обработки изделия в закодированном виде, помещается в устройство ввода ЭП с ЧПУ (рис. 12.5).

В устройстве ввода и обработки программы УВОП с помощью фотосчитывателя ФС и усилителя-формирователя УФ осуществляется покадровое считывание и преобразование закодированной информации программносителя ПН в электрические сигналы. Пока информация с одного считываемого кадра записывается в буферную (промежуточную) память, в рабочей памяти и последующих блоках системы ЧПУ осуществляется обработка инфор-

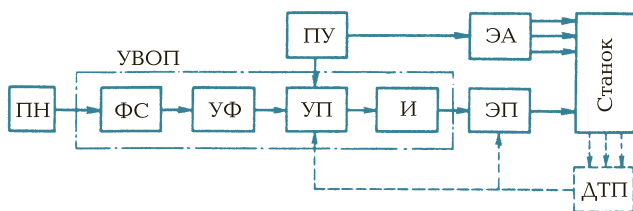


Рис. 12.5. Схема электропривода с ЧПУ

мации предыдущих кадров. По мере освобождения рабочей памяти в нее переводится информация из буферной памяти, что обеспечивает непрерывность процесса управления станком. Буферная и рабочая память входят в устройство памяти УП.

Из устройства памяти электрические сигналы поступают на вход интерполятора (дешифратора) И, который преобразует эти закодированные сигналы в последовательность электрических импульсов (так называемый унитарный код) и подает их на вход ЭП. Последний, осуществляя обработку этой последовательности импульсов, обеспечивает перемещение исполнительного органа станка, при этом число импульсов определяет перемещение, а частота их следования — его скорость. Устройство памяти УП связано с пультом управления ПУ.

Схема ЭП с ЧПУ, показанная на рис. 12.5, может быть дополнена датчиками параметров технологического процесса обработки детали (блок ДТП) и координат электропривода. В этом случае система ЧПУ становится замкнутой и обеспечивает более высокое качество обработки деталей. Кроме того, схема ЭП с ЧПУ содер-

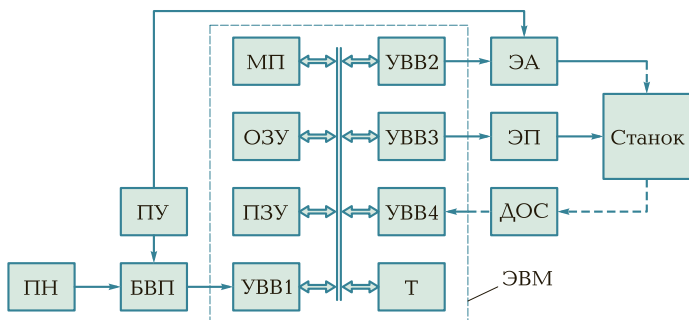


Рис. 12.6. Схема электропривода с ЧПУ с использованием микроЭВМ

жит ряд не показанных на рисунке блоков и устройств, обеспечивающих контроль ввода программы, ее выключение и защиту, а также различные блокировки и сигнализации при работе электрооборудования станка.

В настоящее время наибольшее развитие получили системы ЧПУ с использованием программируемых контроллеров и микроЭВМ (рис. 12.6).

Управляющая программа вводится в ЭВМ с программоносителя ПН (или пульта управления ПУ) через блок ввода программы БВП и устройства ввода-вывода УВВ1. Далее она поступает в устройство памяти микроЭВМ. В постоянном запоминающем устройстве ПЗУ хранятся постоянные части программы, данные для декодирования, интерполирования и необходимых вычислений.

В оперативное запоминающее устройство ОЗУ поступает кроме данных управляющей программы текущая информация от датчиков обратной связи ДОС о ходе технологического процесса, состоянии защит и блокировок, определяющая управляющее воздействие на ЭП и устройства электроавтоматики станка ЭЛ. Связь микроЭВМ с электрооборудованием станка осуществляется через устройства ввода-вывода УВВ2...УВВ4. Кроме того, ЭВМ включает в себя микропроцессор МП и таймер Т.

12.3. ЭЛЕКТРОПРИВОД С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Работа некоторых рабочих машин и производственных механизмов характеризуется случайным изменением в широких пределах условий технологических процессов и различных действующих на них возмущающих воздействий. Для обеспечения наилучшего хода таких технологических процессов ЭП должен иметь возможность изменять соответствующим образом характер своей работы.

Электропривод, функционирование системы управления которого автоматически и целенаправленно изменяется в целях осуществления наилучшего протекания технологического процесса, называется ЭП с адаптивным или самоприспосабливающимся управлением. Другими словами, ЭП с адаптивным управлением обеспечивает оптимальный ход технологического процесса по заданному показателю качества при изменяющихся возмущениях и условиях работы. Автоматическое изменение функционирова-

ния системы управления ЭП называется адаптацией, или самоприспособлением.

Если в ЭП с адаптивным управлением целенаправленно изменяются параметры системы управления, то привод называется *самонастраивающимся*, если изменяются параметры и структура системы управления, — *самоорганизующимся*, если изменяются параметры, структура и закон управления с использованием опыта функционирования ЭП, — *самообучающимся*.

Для осуществления адаптивного управления ЭП служит устройство адаптивного управления (УАУ), которое формирует сигналы управления, обеспечивающие заданный показатель качества технологических процессов, например наивысшую производительность рабочей машины, минимальную стоимость обрабатываемой детали и др.

В общем случае УАУ должно обеспечивать или поддержание этого показателя качества на заданном уровне (*системы стабилизации*), или получение его экстремального значения (*экстремальные системы*).

Системы стабилизации чаще всего основываются на использовании модели технологического процесса, с помощью которой обеспечивается близость характеристик реального и целесообразного (оптимального) технологического процесса.

В экстремальных адаптивных системах параметры системы управления настраиваются на экстремальное значение заданного показателя качества технологического процесса.

По способу получения информации о текущем значении показателя качества экстремальные системы подразделяются на *поисковые* и *беспоисковые*. В поисковых системах показатель качества достигается за счет введения в систему дополнительных поисковых сигналов. В беспоисковых (аналитических) системах он рассчитывается аналитически с помощью специального вычислительного устройства. Если поисковые сигналы генерируются самой системой управления, то такая система называется экстремальной системой с автоколебательным поиском экстремума. При использовании специального дополнительного источника поисковых сигналов реализуется система с принудительным поиском экстремума.

По количеству переменных, от которых зависит показатель качества, экстремальные системы подразделяются на одномерные и многомерные, также они классифицируются по методам поиска алгоритма нахождения экстремума (например, Гаусса — Зейделя, градиента, наискорейшего спуска и др.).

Примером поисковой адаптивной системы управления ЭП может служить система поиска минимального значения тока статора АД в системе ТРН—АД, при котором потери в двигателе оказываются минимальными.

12.4. КОМПЛЕКТНЫЕ И ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ

Прогрессивным явлением при создании средств управления и автоматизации технологических процессов являются разработка и выпуск комплектных ЭП (КЭП) постоянного и переменного тока. Комплектным является регулируемый ЭП, поставляемый заказчику вместе со всеми его функциональными элементами (см. рис. 5.1), согласованными по всем своим характеристикам и параметрам уже на стадиях проектирования, конструирования и изготовления.

КЭП находят все более широкое применение во многих отраслях промышленности — станкостроительной, металлургической, машиностроительной и др. Их быстрое распространение определяется более низкой трудоемкостью при разработке и изготовлении, сокращением времени на электромонтажные и наладочные работы, удобством в эксплуатации.

КЭП различаются по напряжению питающей сети, числу двигателей (одно-, двух- или многодвигательные), виду и номинальным параметрам силового преобразователя, наличию или отсутствию реверса двигателя, виду основной регулируемой координаты (ЭП с регулируемой скоростью, положением, натяжением, мощностью), диапазону и направлению регулирования скорости (однозонные и двухзонные), составу аппаратуры силовой цепи (с линейным контактором или без него), наличию или отсутствию торможения, способу связи с питающей сетью (связь через трансформатор, реактор или без них).

Интегрированный ЭП. В последние годы для некоторых станков и специальных механизмов стали разрабатываться и применяться ЭП с объединением в единую конструкцию нескольких компонент — двигателя, механической передачи, датчиков координат, а в некоторых случаях и силового преобразователя. Такой электромеханический модуль, называемый иногда мехатронным, позволяет в ряде случаев получать более высокие технико-экономические показатели работы ЭП и технологического оборудования.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой ЭП называется комплектным?
2. Какой ЭП называется следящим?
3. Как работает ЭП с программным управлением?
4. В чем особенности работы ЭП с ЧПУ?
5. Какое управление ЭП называется адаптивным?

Список литературы

1. *Беляев А. В.* Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ / А. В. Беляев. — Л. : Энергоатомиздат, 1988.
2. ГОСТ Р 50369—92. Электроприводы. Термины и определения.
3. *Кацман М. М.* Лабораторные работы по электрическим машинам и электроприводу / М. М. Кацман. — М. : Издательский центр «Академия», 2016.
4. *Кацман М. М.* Электрический привод / М. М. Кацман. — М. : Издательский центр «Академия», 2014.
5. *Кацман М. М.* Справочник по электрическим машинам / М. М. Кацман. — М. : Издательский центр «Академия», 2005.
6. *Кацман М. М.* Сборник задач по электрическим машинам / М. М. Кацман. — М. : Издательский центр «Академия», 2014.
7. *Кацман М. М.* Электрические машины приборных устройств и средств автоматизации / М. М. Кацман. — М. : Издательский центр «Академия», 2006.
8. *Келим Ю. И.* Типовые элементы систем автоматического управления / Ю. И. Келим. — М. : Форум, 2004.
9. *Копылов И. П.* Электрические машины / И. П. Копылов. — М. : Высш. шк., 2002.
10. *Москаленко В. В.* Электрический привод / В. В. Москаленко. — М. : Издательский центр «Академия», 2014.
11. *Терехов В. М.* Элементы автоматизированного электропривода / В. М. Терехов. — М. : Энергоатомиздат, 1987.
12. Электрические и электронные аппараты / под ред. Ю. К. Розанова. — М. : Энергоатомиздат, 1998.
13. Электротехнический справочник. Использование электрической энергии / под общ. ред. И. Н. Орлова и др. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — Т. 3. — Кн. 2.

Предисловие.....	4
Введение.....	6
В.1. Назначение электрических машин, трансформаторов и электропривода.....	6
В.2. Электрические машины — электромеханические преобразователи энергии	9
В.3. Классификация электрических машин	13

РАЗДЕЛ I

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ

Глава 1. Трансформаторы.....	17
1.1. Назначение и области применения трансформаторов	17
1.2. Принцип действия и устройство трансформаторов	18
1.3. Трансформирование трехфазного напряжения и схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов.....	26
1.4. Потери мощности и КПД трансформатора	28
1.5. Регулирование напряжения трансформаторов	32
1.6. Группы соединения обмоток трансформаторов	35
1.7. Параллельная работа трансформаторов	40
1.8. Автотрансформаторы	43
1.9. Силовые трансформаторы общего назначения.....	48
Глава 2. Асинхронные электрические машины	55
2.1. Принцип действия и устройство асинхронной машины	55
2.2. Потери мощности и КПД асинхронного двигателя	64
2.3. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.....	69
2.4. Однофазные асинхронные двигатели	71
2.5. Линейные асинхронные двигатели.....	77
Глава 3. Синхронные электрические машины	81
3.1. Устройство и способы возбуждения синхронных машин.....	81
3.2. Принцип действия синхронного генератора	91
3.3. Характеристики синхронного генератора.....	94
3.4. Потери мощности и КПД синхронных машин	101
3.5. Принцип действия и характеристики синхронного двигателя	103
3.6. Синхронный компенсатор.....	109

3.7. Синхронные машины специального назначения	112
Глава 4. Электрические машины постоянного тока	125
4.1. Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока	125
4.2. Устройство коллекторной машины постоянного тока	129
4.3. Свойства и рабочие характеристики генераторов постоянного тока	132
4.4. Свойства и рабочие характеристики двигателей постоянного тока	143
4.5. Потери мощности и КПД машин постоянного тока	151
4.6. Универсальные коллекторные двигатели	157
4.7. Машины постоянного тока специального назначения	158

РАЗДЕЛ II ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Глава 5. Механика электропривода.....	165
5.1. Назначение и виды электроприводов.....	165
5.2. Уравнение движения электропривода.....	169
5.3. Расчетные схемы механической части электропривода	171
5.4. Установившееся движение электропривода и его устойчивость.....	177
5.5. Неустановившееся движение электропривода	180
Глава 6. Регулирование координат электропривода.....	188
6.1. Регулирование скорости движения.....	188
6.2. Регулирование момента и тока двигателей.....	192
6.3. Регулирование положения.....	194
6.4. Структуры электропривода	195
Глава 7. Электроприводы с двигателями постоянного тока.....	199
7.1. Схема включения и статические характеристики двигателя независимого возбуждения	199
7.2. Энергетические режимы работы двигателя независимого возбуждения	202
7.3. Регулирование скорости двигателя независимого возбуждения с помощью резисторов в цепи якоря.....	205
7.4. Расчет регулировочных резисторов в цепи якоря.....	207
7.5. Регулирование тока и момента при пуске, торможении и реверсе двигателя.....	209
7.6. Регулирование скорости двигателя независимого возбуждения изменением магнитного потока.....	213
7.7. Регулирование координат электропривода с двигателем независимого возбуждения изменением напряжения якоря	217

7.8. Регулирование координат в системе «источник тока — двигатель»	224
7.9. Импульсное регулирование скорости электропривода с двигателем независимого возбуждения	226
7.10. Схема включения, характеристики и режимы работы двигателя последовательного возбуждения	229
7.11. Регулирование координат электропривода с двигателем последовательного возбуждения	233
7.12. Торможение электропривода с двигателем последовательного возбуждения	236
7.13. Схема включения, характеристики и свойства электропривода с двигателем смешанного возбуждения	240
7.14. Разомкнутые схемы управления электропривода с двигателями постоянного тока	242
7.15. Замкнутые схемы управления электропривода с двигателями постоянного тока	245
Глава 8. Электроприводы с асинхронным двигателем	260
8.1. Схемы включения, характеристики и режимы работы трехфазного асинхронного двигателя	260
8.2. Регулирование координат асинхронного двигателя с помощью резисторов	268
8.3. Расчет регулировочных резисторов	271
8.4. Регулирование координат электропривода с асинхронным двигателем изменением напряжения	276
8.5. Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением частоты питающего напряжения	280
8.6. Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов	285
8.7. Регулирование скорости асинхронного двигателя в каскадных схемах его включения	288
8.8. Торможение асинхронного двигателя	291
8.9. Особенности переходных процессов в асинхронном двигателе и их формирование	295
8.10. Схемы управления электроприводов с асинхронными двигателями	298
Глава 9. Электроприводы с синхронными двигателями	310
9.1. Схема включения, характеристики и режимы работы синхронного двигателя	310
9.2. Пуск синхронного двигателя	312
9.3. Торможение синхронного двигателя	315
9.4. Регулирование скорости синхронного двигателя	316
9.5. Электропривод с шаговым двигателем	320
9.6. Вентильно-индукторный электропривод	323
9.7. Схемы управления электроприводов с синхронными двигателями	325

Глава 10. Энергетика электропривода	328
10.1. Потери мощности и энергии в установившемся режиме работы электропривода	328
10.2. Потери мощности и энергии в переходных режимах электропривода	332
10.3. Коэффициент полезного действия электропривода	335
Глава 11. Выбор и проверка двигателей	337
11.1. Расчет мощности и выбор двигателей	337
11.2. Проверка двигателей по нагреву прямым методом	342
11.3. Проверка двигателей по нагреву косвенными методами	345
Глава 12. Электроприводы специального назначения и исполнения	350
12.1. Следящий электропривод	350
12.2. Электропривод с программным управлением	355
12.3. Электропривод с адаптивным управлением	359
12.4. Комплектные и интегрированные электроприводы	361
Список литературы	363

Учебное издание

**Москаленко Владимир Валентинович,
Кацман Марк Михайлович**

Электрические машины и приводы

Учебник

Редактор *И. В. Могилевец*

Компьютерная верстка: *Р. Ю. Волкова*

Корректоры *Л. В. Гаврилина, С. Ю. Свиридова*

Изд. № 701219532. Подписано в печать 17.07.2018. Формат 60 × 90/16.
Гарнитура «Балтика». Усл. печ. л. 23,0.

ООО «Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1. Тел./факс: (495) 648-0507, 616-0029.
Сертификат соответствия № РОСС RU.АД77.Н02114 от 31.05.2018.