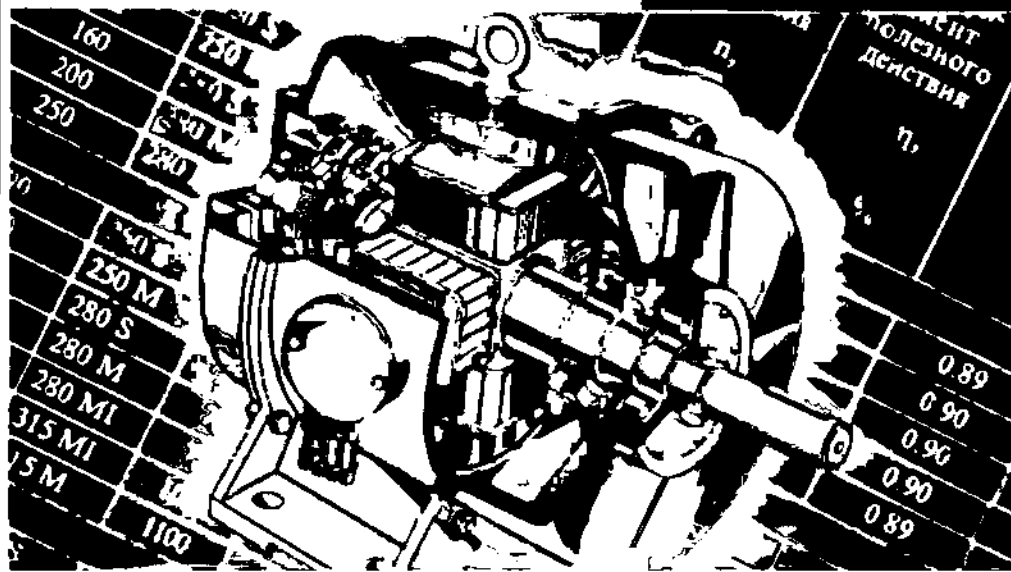


М. М. Кацман

СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ACADEMIA



УДК 621.313(075.32)

ББК 31.261я723

К30

Рецензенты:

канд. техн. наук *Ю. М. Келим* (Московский технический университет связи и информатики);
действительный член Академии изобретательства, акад. *И. С. Туревский*
(Отраслевой автомобильный колледж)

Кацман М. М.

К30

Справочник по электрическим машинам: Учеб. пособие для студ. образ-
зоват. учреждений сред. проф. образования / Марк Михайлович Кацман. —
М.: Издательский центр «Академия», 2005. — 480 с.

ISBN 5-7695-1686-0

В справочнике приведены технические данные по электрическим машинам как об-
щего, так и специального назначения, широко применяемым в современном электро-
приводе. Рассмотрены вопросы выбора и расчета мощности электродвигателей для элек-
тропривода в наиболее используемых режимах его работы, вопросы энергосбережения,
технического обслуживания и техники безопасности при эксплуатации электрических
машин.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образова-
ния. Может быть полезен специалистам средней и высшей квалификации, работа кото-
рых связана с проектированием, эксплуатацией и ремонтом электромеханического обо-
рудования.

УДК 621.313(075.32)

ББК 31.261я723

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

© Кацман М. М., 2005

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2005

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2005

ISBN 5-7695-1686-0

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебном пособии приведены подробные справочные сведения по всем видам электрических машин: асинхронным, синхронным, машинам постоянного тока, а также машинам малой мощности, применяемым в приборостроении и автоматических системах. Основное внимание уделено рассмотрению серий электрических машин, изготавливаемых отечественной промышленностью в настоящее время.

Электрическая машина — главный элемент любой энергетической установки, поэтому для специалистов, работающих в сфере производства или эксплуатации электрических машин, необходимы не только знание теории и понимание физической сущности электромагнитных, механических и тепловых процессов, протекающих в электрических машинах. Не менее важно разбираться в многообразии конструктивных форм исполнения электрических машин; уметь рассчитывать требуемую мощность и выбирать типоразмер электрической машины с учетом ее технических данных и конструктивного исполнения по степени защиты, способу вентиляции и виду монтажа, а также климатических условий и мест эксплуатации. Необходимо ориентироваться в возможных неисправностях, возникающих при эксплуатации электрических машин, причинах их появления и способах устранения. Успешное решение этих задач, а также вопросов, которые могут

возникнуть у специалиста, связанного с эксплуатацией электрических машин, — главное назначение справочника.

Основу современного силового электропривода составляют низковольтные (до 1000 В) асинхронные двигатели на стандартную частоту переменного тока (50 или 60 Гц) мощностью от 0,25 до 400 кВт. Подтверждением этому служит то, что данные двигатели потребляют до 40 % всей производимой в мире электроэнергии. Таким образом, материал, касающийся асинхронных двигателей, занимает в книге значительное место.

В справочнике рассмотрен комплекс вопросов, связанных не только с выбором электрических машин, но и с их эксплуатацией. Это типовые схемы автоматического управления двигателями, устройства мягкого пуска и управления частотой вращения асинхронных двигателей, устройства для возбуждения синхронных двигателей, расчет требуемой мощности и выбор двигателей для различных режимов работы электроприводов, подготовка электрических машин к первому включению, энергосбережение и правила техники безопасности при обслуживании электрических машин. Учитывая это, читателю целесообразно начать ознакомление с учебным пособием с оглавления, чтобы определить круг вопросов, при решении которых справочник может оказаться полезным.

Используемые в справочнике буквенные обозначения параметров и размеров приведены в конце книги.

Справочник предназначен для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образо-

вания. Он будет также полезен широкому кругу специалистов средней и высшей квалификации, работа которых связана с проектированием, эксплуатацией и ремонтом электромеханического оборудования.

РАЗДЕЛ I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

ГЛАВА 1

НАЗНАЧЕНИЕ, КЛАССИФИКАЦИЯ

И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

1.1. Назначение и принцип действия электрических машин

Электрическая машина представляет собой электромеханическое устройство, предназначенное для преобразования либо механической энергии в электрическую (электрический генератор), либо электрической энергии в механическую (электрический двигатель).

Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях электрическими машинами — генераторами, преобразующими механическую энергию турбин в электрическую.

В процессе потребления электрической энергии происходит ее преобразование в другие виды энергий (тепловую, механическую, химическую). Около 60 % всей вырабатываемой электроэнергии используется для приведения в движение станков, механизмов, транспортных средств, т.е. для преобразования ее в механическую энергию. Это преобразование осуществляется электрическими машинами — *электродвигателями*.

Электродвигатель — основной элемент *электропривода* рабочих машин. Хорошая управляемость электрической

энергии, простота ее распределения, доставки и преобразования в механическую энергию посредством электродвигателей привело к тому, что электрический привод стал преобладающим по сравнению с другими видами приводов.

Электродвигатели широко применяют на транспорте в качестве тяговых двигателей, приводящих во вращение колесные пары электропоездов, троллейбусов и др.

За последнее время значительно возросло применение электрических машин малой мощности — микромашин мощностью от долей до нескольких сотен ватт. Такие электрические машины используют в приборостроении, автоматических системах, в бытовой технике — пылесосах, холодильниках, вентиляторах и др. Мощность этих двигателей невелика, конструкция проста и надежна, и изготавливают их в больших количествах.

В настоящее время существуют разнообразные конструктивные формы электрических машин, но подавляющее их большинство построено на принципе вращательного движения подвижной части относительно неподвижной. Обобщенная конструкция та-

кой электрической машины (рис. 1.1) 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, а другая — имеет обмотку, которую можно условно назвать *рабочей обмоткой машины*. Как неподвижная часть машины (статор), так и подвижная (ротор) имеют сердечники, выполненные из магнитномягкого материала и обладающие небольшим магнитным сопротивлением.

Если электрическая машина работает в режиме генератора, то при вращении ротора (под действием приводного двигателя) в рабочей обмотке наводится ЭДС и при подключении к ней потребителя появляется электрический ток. При этом механическая энергия приводного двигателя преобразуется в электрическую энергию, расходуемую в потребителе. Если машина предназначена для работы в качестве электродвигателя, то рабочая обмотка машины подключается к сети. При этом ток, возникший в этой обмотке, взаимодействует с магнитным полем возбуждения и на роторе возникают электромагнитные силы, при-

водящие ротор во вращение. При этом электрическая энергия, потребляемая двигателем из сети, преобразуется в механическую, затрачиваемую на приведение в действие какого-либо механизма, станка, транспортного средства и т. п.

Принцип действия электрических машин основан на законах электрических и магнитных явлений: законе электромагнитной индукции и законе Ампера. Сущность закона электромагнитной индукции применительно к электрической машине состоит в том, что при движении проводника в магнитном поле со скоростью v в направлении, перпендикулярном вектору магнитной индукции B , в нем индуцируется ЭДС

$$E = Blv, \quad (1.1)$$

где l — активная длина проводника, т.е. часть его общей длины, находящаяся в магнитном поле.

Если же проводник замкнуть, то в этом проводнике появится электрический ток I . В результате взаимодействия этого тока с внешним магнитным полем на проводник начнет действовать электромагнитная сила, которая определяется по закону Ампера,

$$F_{\text{эм}} = BIl. \quad (1.2)$$

Эта сила направлена встречно внешней силе F , вызвавшей движение проводника.

При равномерном движении проводника силы, действующие на проводник, равны $F = F_{\text{эм}}$. Умножив обе части равенства на скорость движения проводника v , получим равенство

$$Fv = F_{\text{эм}}v.$$

Подставив в это выражение значение $F_{\text{эм}}$ по (1.2), получим

$$Fv = BIlv = EI. \quad (1.3)$$

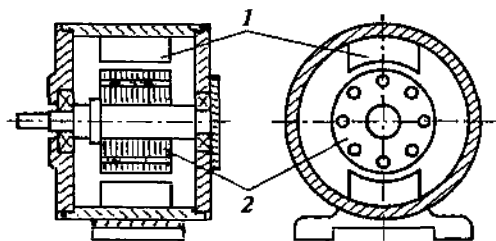


Рис. 1.1. Обобщенная конструктивная схема электрической машины вращательного действия

Левая часть равенства (1.3) 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 подтверждает, что в генераторе механическая мощность Fv затрачивается на перемещение проводника в магнитном поле и преобразуется в электрическую мощность EI . При этом проводник перемещается перпендикулярно вектору магнитной индукции.

В электрическом двигателе внешнюю силу F к проводнику не прикладывают, а от источника электроэнергии подводят к нему напряжение U . При этом на проводник действует только электромагнитная сила $F_{\text{эм}}$, под действием которой проводник движется в магнитном поле, и в нем индуцируется ЭДС E 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 этом проводнике:

$$U = E + Ir, \quad (1.4)$$

где r — электрическое сопротивление проводника.

Умножив обе части равенства на ток I , получим

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

Подставляя вместо E значение ЭДС по (1.1), получим

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

или, согласно (1.2),

$$UI = F_{\text{эм}}v + I^2r. \quad (1.5)$$

Из этого равенства следует, что электрическая мощность (UI), поступающая в электрический двигатель из сети, частично преобразуется в механическую мощность ($F_{\text{эм}}v$), а частично расходуется на покрытие электрических потерь в проводнике (I^2r).

Изложенное выше позволяет сделать вывод:

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

■ при работе электрической машины в режимах генератора или двигателя одновременно наблюдаются как процесс индуцирования ЭДС, определяемой законом электромагнитной индукции [см. (1.1)], так и явление возникновения электромагнитных сил, определяемых законом Ампера [см. (1.2)].

Диапазон мощностей электрических машин весьма широк — от долей ватта до тысяч мегаватт. Большинство электрических машин используется в качестве электродвигателей, меньшая часть — в качестве генераторов. Генераторы переменного тока используются главным образом на электростанциях. Обычно это электрические машины весьма большой единичной мощности, измеряемой десятками, сотнями и даже тысячами МВт.

Основы создания электрических машин были заложены в начале XIX в. М. Фарадеем, открывшим закон электромагнитной индукции и установившим возможность взаимного преобразования электрической и механической энергий. Важную роль в создании электрических машин имели работы ученых П. Барлоу, Ф. Араго, Д. Максвелла и Э. Ленца. Дальнейшее развитие процессов взаимного преобразо-

вания электрической и механической энергий, их практическая реализация в конкретных конструкциях электродвигателей получили в работах русских ученых Б. С. Якоби и М. О. Доливо-Добровольского. Этими учеными были разработаны и созданы конструкции электродвигателей, явившиеся прототипами современных электрических машин.

В начале XX в. были созданы основные типы электрических машин и разработаны ключевые положения теории электромашиностроения. Большое значение в этот период имели работы ученых Э. Арнольда, А. Блонделя, Л. Дрейфуса, К. А. Круга, В. С. Кулебакина, К. И. Шенфера. Большой вклад в развитие теории и практики электрических машин внесли работы ученых в середине прошлого века. К ним относятся, в первую очередь, работы советских ученых: В. Т. Касьянова, Л. М. Пиотровского, М. П. Костенко, Г. Н. Петрова, А. И. Вольдека и многих других.

1.2. Классификация электрических машин

Использование электрических машин в качестве генераторов и двигателей является их главным назначением, так как оно связано исключительно с целью взаимного преобразования электрической и механической энергий. Электрические машины применяют также для усиления мощности электрических сигналов. Такие электрические машины называют *электромашинами 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* — машин весьма малой мощности (от долей ватта до 600 Вт). Эти электрические машины используют не только в качестве двигателей, но и как *тахогенераторы* (для преобразования частоты вращения в электрический сигнал), *сельсины* (для получения электрических сигналов, пропорциональных углу поворота вала) и т. п.

Из приведенных примеров видно, насколько разнообразно разделение электрических машин по их назначению.

Рассмотрим классификацию электрических машин по принципу действия, согласно которой все электрические машины разделяются на бесколлекторные и коллекторные, различающиеся как принципом действия, так и конструкцией. *Бесколлекторные машины* — это машины переменного тока — асинхронные и синхронные. Асинхронные машины применяют преимущественно в качестве двигателей, а синхронные — как в качестве двигателей, так и генераторов. *Коллекторные машины* используют главным образом для работы на постоянном токе в качестве генераторов или двигателей. Лишь коллекторные машины небольшой мощности делают универсальными двигателями, способными работать как от сети постоянного, так и 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 могут быть с короткозамкнутым или фазным ротором. Синхронные машины и коллекторные машины постоянного тока в зависимости от способа создания в них магнитного поля возбуждения разделяют на машины с обмоткой возбуждения и машины с постоянными магнитами.

На рис. 1.2 представлена диаграмма классификации электрических машин, содержащая основные их виды, получившие наибольшее применение в современной электроэнергетике.

Условия работы электрической машины, воздействие на нее окружающей среды (температура, влажность и т.п.) приводят к необходимости со-

здания электрических машин разной конструкции, отличающихся степенью защиты от воздействия факторов окружающей среды и рабочими свойствами. В связи с этим все электрические машины разделяют на машины общего и специального назначения.

1.3. Преобразование энергий в электрических машинах

Процесс работы электрической машины состоит во взаимном преобразовании электрической и механической энергий. Однако при более подробном рассмотрении этого процесса в электрической машине обнаруживается, что взаимное преобразование указанных энергий неминуемо связано с возникновением третьего вида



Рис. 1.2. Классификация электрических машин

энергии — тепловой. Причиной этому являются потери, сопровождающие работу любой электрической машины. Основными являются магнитные потери (потери на гистерезис и вихревые токи) в магнитопроводе электрической машины, электрические потери в обмоточных проводах машины, обусловленные их нагревом проходящими по этим обмоткам токами, и механические потери, вызванные силами трения в движущихся частях машины. Все эти потери преобразуются в теплоту. При этом количество выделенной в машине теплоты Q пропорционально мощности потерь $\sum P$. Эта теплота идет на нагрев машины до некоторой установившейся температуры $\theta_{уст}$ и частично рассеивается в окружающую машину среду (рис. 1.3).

Механическая мощность подводится к машине или снимается с нее через вал, а электрическая мощность подводится или снимается с клемм, расположенных в коробке выводов машины. Механическая мощность определяется произведением момента M на валу машины на угловую скорость вращения этого вала ω :

$$P_{мех} = M\omega, \quad (1.6)$$

а электрическая мощность определяется произведением напряжения на клеммах машины U на силу тока I , подводимого к машине или отбираемого от нее:

$$P_{эл} = UI \cos \varphi. \quad (1.7)$$

Как уже отмечалось, преобразование энергии в электрических машинах неминуемо связано с потерями в ней. По этой причине потребляемая электрической машиной мощность всегда больше отдаваемой (полезной) мощности. Разность между этими мощностями и составляет мощность потерь $\sum P$.

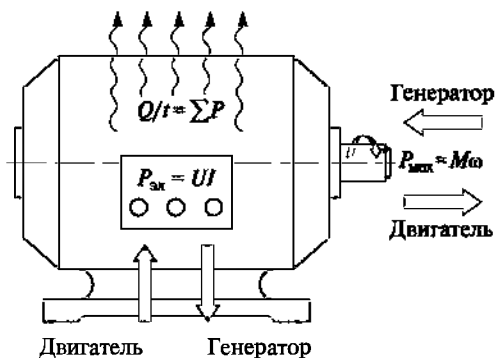


Рис. 1.3. К понятию о преобразовании энергий в электрической машине

Из этого следует, что коэффициент полезного действия (КПД) электрической машины всегда меньше 100 %. Однако по сравнению с другими видами машин, например тепловыми, в которых возможно преобразование тепловой энергии в механическую, электрические машины являются наиболее совершенными преобразователями энергии, так как их КПД может достигать значительных величин: в машинах весьма большой единичной мощности он может достигать 99,5 %, в машинах средней мощности 70—90 %. Исключение составляют электрические машины небольшой мощности (не превышающей нескольких сотен ватт), КПД которых может составлять от 20 до 60 %. Но даже при столь малых единичных мощностях КПД электрических машин все же больше, чем в машинах другого принципа работы.

Высокие энергетические показатели электрических машин, удобство подвода и отвода энергии, экологическая чистота электромеханических процессов в электрических машинах, возможность изготовления машин широкого диапазона единичной мощности, простота и удобство обслужи-

вания и управления — основные причины широкого применения электрических машин во всех областях жизнедеятельности человека.

Таким образом, любая электрическая машина в процессе работы нагревается, и температура ее частей повышается. Для надежной работы в течение установленного для электрической машины срока эксплуатации необходимо, чтобы температура нагревания частей машины (в первую очередь ее обмоток) не превышала допустимых значений (см. 2.6). Это влечет за собой ограничение мощности машины при заданных ее габаритах и способах охлаждения. В итоге получается, чем больше мощность электрической машины, тем большими должны быть ее габариты или в ней должны быть применены более эффективные способы охлаждения. Часто в электрических машинах используются оба фактора одновременно.

Обобщая изложенное, необходимо отметить, что при взаимном преобразовании электрической и механической энергий элементы электрических машин испытывают электрические, магнитные, тепловые и механические нагрузки. Способность машины успешно противостоять этим нагрузкам с заданными технико-экономическими параметрами, показателями надежности и климатическим воздействием должно подтверждаться соответствующими расчетами, выполняемыми при проектировании электрических машин. Отсюда следует, что проектирование электрической машины представляет собой сложную задачу и включает целый ряд расчетов: электромагнитный, вентиляционный, тепловой, механический, расчет размерных цепей, расчет шумов и вибраций.

Преобразование энергии в электрической машине происходит в пространстве (в объеме) действия основного магнитного поля при наличии в нем проводников с электрическим током. Части электрической машины, непосредственно участвующие в энергопреобразовательном процессе и взаимодействующие в указанном пространстве (объеме), называют *активными частями*. К ним относят магнитопроводы, обмотки, промежутки (зазоры) между вращающимися и неподвижными частями (см. рис. 1.1).

Но для реализации энергопреобразовательных процессов необходимы еще и *конструктивные части*. Хотя эти части в энергопреобразовании непосредственно не принимают участия, без них работа электрической машины невозможна. Конструктивные части выполняют следующие функции:

- обеспечивают активным частям (магнитопроводам и обмоткам) требуемое пространственное расположение и их взаимное перемещение (корпус, вал, подшипники);
- подводят электрическую энергию из сети к обмоткам или наоборот от обмоток в сеть (клеммы коробки выводов и соединительные провода);
- передают механическую энергию от электрической машины (двигателя) к рабочей машине или от приводного двигателя к электрической машине (генератору);
- охлаждают машину, не допуская ее перегрева свыше допустимого значения (вентилятор);
- защищают активные части машины от повреждений воздействием внешних факторов (влаги, вредных газов, посторонних предметов);
- защищают обслуживающий персонал от соприкосновения с токоведущими и движущимися частями, т. е. де-

лают обслуживание машины безопасным;

- обеспечивают монтаж машины в месте ее установки (лапы или фланцы).

1.4. Техничко-экономические требования к электрическим машинам

Электрические машины, как и любые другие изделия, должны удовлетворять комплексу требований, так как только в этом случае машины будут успешно выполнять функции, для которых они предназначены.

Современный уровень развития электромашиностроения характеризуется большим разнообразием электрических машин, различающихся конструкцией, рабочими характеристиками, способностью выдерживать воздействие внешних факторов и т.п. Поэтому требования, предъявляемые к этим машинам, также весьма разнообразны. Весь комплекс этих требований разделяют на два вида — технические и экономические.

Технические требования можно сформулировать следующим образом: электрическая машина должна надежно работать в условиях, для которых она предназначена, в течение срока, не менее указанного в технических условиях (ТУ), развивая при этом требуемую мощность при номинальных значениях напряжения, частоты вращения, КПД и других параметрах, указанных в паспорте машины. При этом электрическая машина должна быть удобной и безопасной в эксплуатации.

Однако приведенная формулировка технических требований не содержит конкретных данных о допускае-

мых отклонениях параметров машины от номинальных, о допускаемых значениях температуры окружающей среды и влажности, а также целый ряд других конкретных сведений. Необходимые технические требования к проектируемой электрической машине изложены в соответствующих Государственных стандартах. Например, ГОСТ 183—74 «Машины электрические вращающиеся» определяет общие технические требования ко всем вращающимся электрическим машинам (кроме машин для бортовых систем подвижных средств транспорта). Они дополняются техническими требованиями других стандартов в зависимости от назначения электрической машины (электродвигатель или генератор), ее мощности, напряжения, условий эксплуатации и т.п. Кроме того, отдельные отрасли хозяйства предъявляют к электрическим машинам дополнительные технические требования, которые обычно регламентируются отраслевыми нормами или стандартами, техническими условиями. Возможны также и индивидуальные требования, вытекающие из конкретных условий эксплуатации электрической машины.

Такое разнообразие требований к электрическим машинам привело к необходимости их разделения на два вида: электрические машины общего назначения и электрические машины специального назначения.

Электрические машины общего назначения — это вращающиеся электрические машины, свойства которых удовлетворяют совокупности технических требований, общих для большинства случаев их применения.

Электрические машины специального назначения — это машины с вращательным или иным видом движения под-

вижной части (например, поступательным), выполненные с учетом специальных требований, обусловленных особенностями эксплуатации электрических машин. К таким машинам следует отнести двигатели для электроприводов машин и механизмов, эксплуатируемых в условиях повышенной температуры окружающей среды (металлургическое производство). Эти двигатели должны быть рассчитаны на более высокую температуру перегрева, с применением в них изоляционных материалов более высокого класса нагревостойкости. Двигатели, предназначенные для электроприводов с частыми пусками, торможениями и реверсами, должны иметь ротор (якорь) с небольшим моментом инерции, что облегчит протекание в этих двигателях переходных процессов. К электрическим машинам специального назначения следует отнести взрывозащищенные, погружные и некоторые другие виды двигателей, предназначенных для эксплуатации в особых условиях (в пожаро- и взрывоопасных средах или будучи погруженными в скважину, заполненную водой и т. п.).

Экономические требования к электрической машине в конечном счете сводятся к тому, чтобы процесс преобразования энергии с применением данной электрической машины давал большую экономию, чем это было при использовании старой машины, либо при применении какого-либо другого принципа реализации заданного процесса. Таким образом, главным критерием экономичности применения новой электрической машины в электроприводе является снижение как капитальных, так и эксплуатационных затрат.

Эксплуатационные свойства электрической машины определяются

удобством ее монтажа и простотой управления, энергетическими показателями (КПД, коэффициент мощности), возможностью ремонта и другими свойствами, характеризующими экономичность машины в процессе ее эксплуатации.

Формулируя технические и экономические требования к электрической машине, необходимо помнить, что новая электрическая машина, применяемая в электроустановке, по своим технико-экономическим показателям (регулируемым свойствам, КПД, габаритам, динамическим свойствам, стоимости и т. д.) должна быть лучше ранее применяемой электрической машины.

1.5. Характеристики электрических машин.

Понятие об устойчивой работе электрических машин

Как уже отмечалось, основное использование электрических машин состоит в их применении либо в качестве электрического генератора (генератора), либо в качестве электрического двигателя (двигателя). В качестве генераторов используют преимущественно синхронные машины, вырабатывающие электрическую энергию переменного тока. Эти машины составляют основу электростанций и обычно изготавливаются большой единичной мощностью. Генераторы постоянного тока — это коллекторные машины, служащие для обеспечения постоянным током электроустановок небольшой мощности. За последние годы применение таких генераторов резко сократилось из-за широкого внедрения полупроводниковых устройств — преобразователей перемен-

ного тока в постоянный. Наибольшее количество электрических машин используется в качестве двигателей, составляющих основу электрического привода станков, подъемных и строительных механизмов, транспортных средств и т. д.

Свойства электрических машин описываются математическими формулами и уравнениями, многие из которых можно представить в виде графически выраженных функциональных зависимостей, построенных в системе координат вида $y=f(x)$. Такие графики принято называть *характеристиками*.

Основными характеристиками для **электрических генераторов** являются:

внешняя характеристика — зависимость напряжения на выходе генератора от тока нагрузки $U=f(I)$ при неизменных токе возбуждения и частоте вращения ($I_b = \text{const}$ и $n = \text{const}$);

характеристика холостого хода — зависимость напряжения на выходе генератора от тока возбуждения $U=f(I_b)$ в режиме холостого хода и неизменной частоте вращения ($I = 0$ и $n = \text{const}$);

регулировочная характеристика — зависимость тока возбуждения от тока нагрузки $I_b=f(I)$ при неизменной частоте вращения и напряжении на выходе генератора ($U = \text{const}$ и $n = \text{const}$).

Основными характеристиками **электрических двигателей** являются:

механическая характеристика — зависимость частоты вращения от момента нагрузки на валу двигателя (статического момента сопротивления рабочего механизма) $n=f(M)$ при неизменных значениях напряжения питания двигателя, тока возбуждения, сопротивления в цепи рабочей обмотки (обмотки статора и ротора или обмотки якоря), или для асинхронных

двигателей зависимость момента на валу от скольжения $M=f(s)$, при неизменных значениях напряжения питания U и сопротивлений в цепях обмоток статора и ротора;

электрохимическая характеристика — зависимость частоты вращения от тока нагрузки $n=f(I)$ при неизменных значениях напряжения U и сопротивлений в цепях обмоток статора и ротора;

регулировочная характеристика — зависимость частоты вращения от регулирующего параметра: тока возбуждения или напряжения питания;

рабочие характеристики — зависимость КПД η , коэффициента мощности $\cos\phi$, рабочего тока I , частоты вращения n от нагрузки двигателя (полезной мощности) P_2 .

На рис. 1.4 показан примерный вид механических характеристик двигателей, получивших наибольшее применение в электроприводе.

При передаче вращательного движения рабочему механизму двигатель испытывает противодействие со сто-

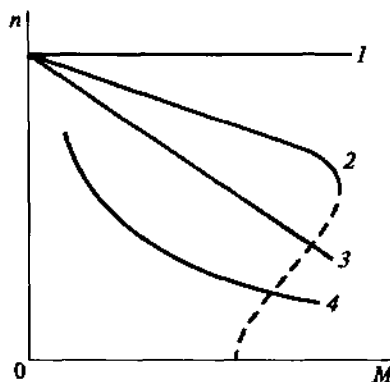


Рис. 1.4. Механические характеристики электродвигателей:

1 — синхронного; 2 — асинхронного; 3 — постоянного тока с независимым возбуждением; 4 — постоянного тока с последовательным возбуждением

роны этого механизма, определяемое *статическим моментом сопротивления* M_c . Статические моменты сопротивления разделяют на активные и реактивные.

Активный статический момент действует неизменно в одном направлении, независимо от направления движения механизма. Такой момент остается неизменным даже при неподвижном механизме, так как он создается постоянно действующими внешними силами. Примером такого момента является статический момент сопротивления подъемного механизма типа «лебедка», создаваемый грузом G , подвешенным на тросе (рис. 1.5).

Гравитационная сила земного притяжения, действующая на груз G , создает статический момент сопротивления независимо от вращения барабана лебедки, т. е. независимо от того, поднимается этот груз, опускается или же остается неподвижным. Величина активного статического момента сопротивления пропорциональна массе

подвешенного груза m и определяется выражением, Н · м,

$$M_c = gm(D_6/2),$$

где D_6 — диаметр барабана, м; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения, которое является переводным коэффициентом между единицей силы ньютоном (Н) и единицей массы килограммом ($1 \text{ кг} = 9,81 \text{ Н}$).

Механическая характеристика активного статического момента $n = f(M_c)$ имеет вид прямой вертикальной линии (рис. 1.6, а), расположенной во втором и третьем квадрантах осей координат. Таким образом, при подъеме груза активный статический момент направлен *против* момента двигателя, вращающего барабан, а при опускании груза — *согласно* с этим моментом.

Реактивные статические моменты сопротивления действуют только в движущихся механизмах, при этом они направлены всегда противоположно этому движению, т. е. противоположно вращающему моменту двигателя. Если же направление движения изменится, то также изменится направление реактивного статического момента. Например, механическая характеристика реактивного статического момента сопротивления, вызванного силами трения в движущихся частях механизма, имеет вид прямых вертикальных линий, расположенных во втором и четвертом квадрантах осей координат (рис. 1.6, б). Приблизительно такую же форму имеют механические характеристики статических моментов, обусловленных силами резания или пластической деформации.

Реактивные статические моменты большинства производственных механизмов зависят не только от направления, но и от скорости движения. При

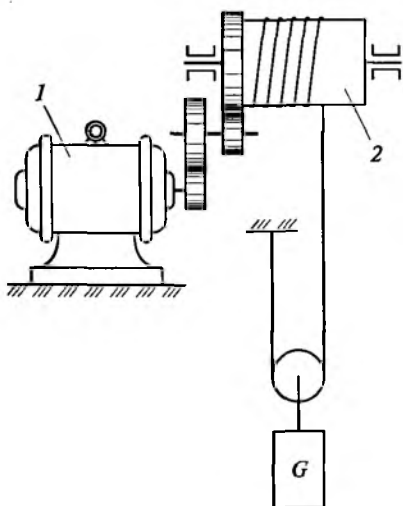


Рис. 1.5. Подъемный механизм (лебедка):

1 — двигатель; 2 — барабан

этом механические характеристики реактивных статических моментов могут иметь разную форму. Например, у центробежных вентиляторов, центробежных насосов и других аналогичных механизмов статический момент сопротивления пропорционален квадрату частоты вращения ($M \sim n^2$). Поэтому механическая характеристика таких механизмов имеет вид *параболы* (рис. 1.6, в).

Металлообрабатывающие станки при постоянной мощности ($P = M_c n = \text{const}$) имеют механическую характеристику, при которой с ростом реактивного статического момента сопротивления M_c частота вращения n уменьшается (рис. 1.6, г).

Рассмотренные механические характеристики механизмов, представленные на рис. 1.6, имеют приближенный вид, так как характеристики реальных механизмов, учитывающие особенности их конструкции и условия эксплуатации, имеют более разнообразную форму.

В связи с тем что реактивные статические моменты сопротивления всегда направлены противоположно вра-

щающему моменту двигателя, величины статических реактивных моментов принимаются со знаком, противоположным знаку вращающего момента приводного двигателя: если вращающий момент двигателя положителен, то статический реактивный момент сопротивления механизма принимают со знаком минус.

Установившийся режим двигателя и рабочей машины — совместная их работа при неизменных значениях частоты вращения и электромагнитного момента. Этому режиму соответствует точка на механической характеристике, в которой имеет место равенство вращающего момента двигателя и статического момента сопротивления рабочего механизма. Для определения координат точки установившегося режима следует воспользоваться механическими характеристиками двигателя и рабочего механизма, построив их в одних осях координат, но в разных квадрантах, как это сделано на рис. 1.7, а. Однако можно упростить эти построения, изобразив в первом квадранте обе характеристики. Точнее, вместо механической характеристики ста-

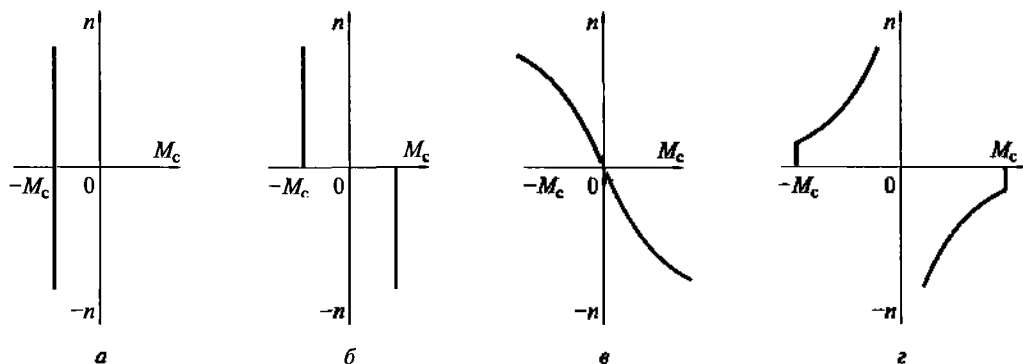


Рис. 1.6. Механические характеристики рабочих механизмов:

а — подъемный механизм (лебедка); б — силы трения, резания, пластической деформации любого механизма; в — центробежный вентилятор, дымосос, центробежный насос; г — станок металлообрабатывающий

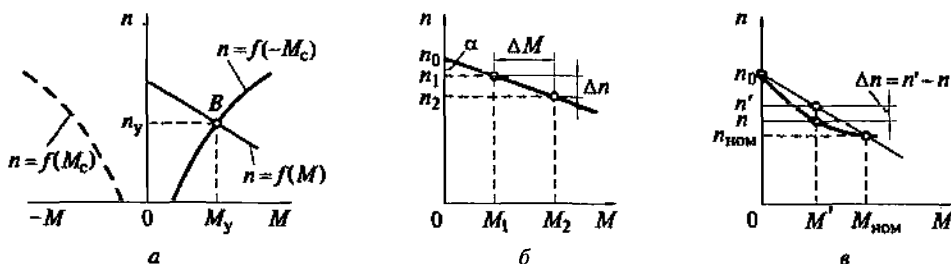


Рис. 1.7. К понятиям об установившемся режиме электропривода (а), жесткости (б) и нелинейности (в) характеристик

тического момента сопротивления рабочей машины $n = f(M_c)$ в первом квадранте строят ее зеркальное изображение $n = f(-M_c)$. Точка пересечения этой характеристики с механической характеристикой двигателя (точка B) с координатами n_y и M_y и будет точкой установившегося режима (рис. 1.7, а).

При оценке характеристик используют понятие *жесткость характеристики*. Количественно жесткость характеристики определяется отношением разности моментов (рис. 1.7, б), развиваемых двигателем, к соответствующей разности частот вращения:

$$\beta = \Delta M / \Delta n,$$

где $\Delta M = M_2 - M_1$ — разность моментов; $\Delta n = n_1 - n_2$ — разность частот вращения.

Для прямолинейной механической характеристики жесткость определяется тангенсом угла α наклона характеристики к оси ординат: $\beta = \operatorname{tg} \alpha$. Если же механическая характеристика криволинейна, то ее жесткость β определяют в рабочей точке, как тангенс угла α наклона касательной, проведенной в этой точке, к оси ординат. Чем больше угол α , тем жестче характеристика; при $\alpha = 90^\circ$ механическая характеристика расположена параллельно оси абсцисс и является *абсолютно жесткой* (см. рис. 1.4, график 1).

Другим показателем механической характеристики является ее *нелинейность* δ , характеризующая степень отклонения реальной характеристики от прямой линии, проведенной через заданные точки на этой характеристике, например, точку пограничной частоты вращения n_0 и точку режима номинальной нагрузки $n_{ном}$ (рис. 1.7, в). Нелинейность характеристики определяется как отношение наибольшей разности Δn между действительным значением частоты вращения n и ее значением, если бы механическая характеристика была прямой линией n' к действительной частоте вращения: $\delta = \Delta n / n$.

Электрический двигатель должен обладать *устойчивостью*, т.е. в нем должна автоматически поддерживаться заданная частота вращения при воздействии каких-либо возмущающих факторов. Рассмотрим этот вопрос на примере механической характеристики двигателя $M = f(n)$, представленной на рис. 1.8 графиком 1. Рабочий механизм, приводимый в движение этим двигателем, создает статический нагрузочный момент M_c , и механическая характеристика этого механизма $M_c = f(n)$ имеет вид прямой линии 2, пересекающей механическую характеристику двигателя в точках A и B . Устойчивая работа двигателя возможна

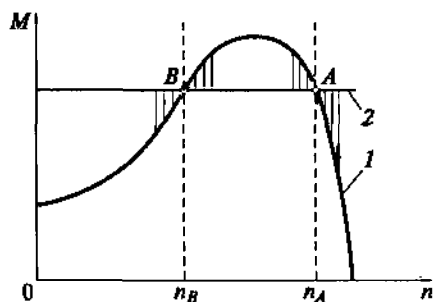


Рис. 1.8. К понятию устойчивости двигателя

вблизи точки A . Объясняется это следующим образом. Если под действием внешних факторов частота вращения двигателя начнет *уменьшаться*, то произойдет увеличение вращающего момента двигателя. Возникший при этом избыточный момент вызовет возрастание частоты вращения до прежнего

значения, и режим работы, соответствующий точке A , будет восстановлен. Если же под влиянием внешних факторов частота вращения двигателя начнет *увеличиваться*, то вращающий момент двигателя начнет убывать, что вызовет снижение частоты вращения двигателя, пока процесс не вернется в точку A и прежняя частота вращения не восстановится.

Вблизи точки B двигатель не обладает устойчивостью, так как здесь понижение частоты вращения сопровождается уменьшением вращающего момента двигателя, в итоге частота вращения будет продолжать снижаться вплоть до остановки ротора. При увеличении частоты вращения момент двигателя также возрастает, что ведет к дальнейшему росту частоты вращения и т.д.

ГЛАВА 2

СТАНДАРТИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

2.1. Номинальные данные электрических машин

Номинальные данные электрической машины — это совокупность числовых значений электрических и механических параметров, обусловленных изготовителем, которым удовлетворяет электрическая машина в заданных условиях эксплуатации. Таковыми данными являются: номинальная мощность (кВт или $\text{кВ} \cdot \text{А}$), номинальное напряжение (В), номинальный ток (А), номинальная частота вращения (об/мин), номинальные КПД (%), коэффициент мощности, частота пе-

ременного тока (Гц), число фаз, режим работы машины [длительный, кратковременный, повторно-кратковременный либо другой (см 2.8)]. Возможны и другие номинальные величины, определяющие свойства электрической машины, значения которых влияют на надежную устойчивую ее работу в течение установленного срока эксплуатации. Основные номинальные данные электрической машины обычно отчетливо нанесены на щиток, представляющий собой металлическую пластину (рис. 2.1), прикрепленную к корпусу машины. Полный перечень номинальных данных

Рис. 2.1. Щиток паспортных данных электрической машины

приводится в паспорте и каталоге данной машины.

Наиболее важным номинальным параметром является *номинальная мощность* электрической машины, т.е. мощность, на которую рассчитана данная машина по условиям ее допустимого перегрева.

Для двигателей номинальной называют полезную механическую мощность на валу, вращающемся с номинальной угловой скоростью $\omega_{2\text{ном}}$ при номинальном нагрузочном моменте $M_{2\text{ном}}$:

$$P_{\text{ном}} = M_{2\text{ном}} \omega_{2\text{ном}}.$$

Обычно в паспорте и каталоге вращающейся электрической машины указана номинальная частота вращения вала $n_{2\text{ном}}$, тогда

$$P_{\text{ном}} = 0,105 M_{2\text{ном}} n_{2\text{ном}}.$$

Для генераторов номинальной называют полезную электрическую мощность, определяемую произведением номинальных электрических величин на выводах генератора, например, для трехфазного синхронного генератора

$$P_{\text{ном}} = m_1 U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} \cos \varphi_{1\text{ном}},$$

где m_1 — число фаз, для трехфазной системы $m_1 = 3$; $U_{1\text{ном}}$ — номинальное (фазное) напряжение на выводах об-

мотки статора; $I_{1\text{ном}}$ — номинальный (фазный) ток статора; $\cos \varphi_{1\text{ном}}$ — номинальное значение коэффициента мощности.

Режим работы электрической машины, при котором значения каждого из параметров равно номинальному, называется *номинальным режимом*.

Электрическая машина может работать и в ненормальном режиме, например работа с недогрузкой ($P < P_{\text{ном}}$). Однако в этом случае энергетические показатели машины (КПД и коэффициент мощности) могут оказаться намного ниже номинальных значений, указанных в паспорте машины. Возможна и перегрузка электрической машины, но ее величина и продолжительность не должны превышать значений, записанных в паспорте (каталоге) данной машины, если ее перегрузка допускается.

2.2. Стандартизация основных параметров электрических машин

Стандартизация основных параметров электрических машин относится, в первую очередь, к номинальной мощности, номинальному напряжению, номинальной частоте вращения. Стандартизация электрических машин по высоте оси вращения, установочным и присоединительным размерам создает определенные удобства как при изготовлении электрических машин, так и при комплектовании этими машинами энергетических установок и устройств электропривода. Стандартизация указанных параметров позволяет избежать неоправданного увеличения типоразмеров электрических машин. Кроме того, такая стандартизация необходима для международной торгов-

ли электрическими машинами и различным оборудованием, совместно с которым эксплуатируются электрические машины.

ГОСТ 12139—84 устанавливает ряды номинальных мощностей, напряжений и частот. Ряд номинальных мощностей (кВт): 0,06; 0,09; 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000.

Номинальные напряжения для электрических машин (до 1000 В) приведены в табл. 2.1.

Двигатели переменного тока большой мощности (500 кВт и более) обычно изготовляют на номинальные напряжения: 6 или 10 кВ.

Номинальные частоты вращения электрических машин определены ГОСТ 10683—73. Например, при частоте переменного тока 50 Гц для синхронных генераторов установлены синхронные частоты вращения (об/мин): 125; 150; 157,6; 214,3; 250; 300; 375; 428,6; 500; 600; 750; 1000; 1500; 3000. Для синхронных и асинхронных двигателей используется эта же шкала, за исключением частоты вращения 428,6 об/мин, но дополнительно включены частоты вращения 100 и 166,6 об/мин.

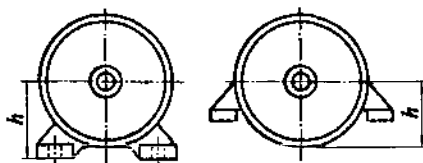


Рис. 2.2. Высота оси вращения

Для двигателей постоянного тока допускаются номинальные частоты вращения (об/мин): 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 750, 1000, 1500, 2000, 2200, 3000.

В электрических машинах современных серий основным габаритным параметром является высота оси вращения машины. За высоту оси вращения h электрической машины принимается расстояние от оси вращения вала до опорной плоскости лап (рис. 2.2). Высоты осей вращения электрических машин согласно ГОСТ 13267—73 должны соответствовать следующему ряду: 25, 28, 32, 36, 40, 45, 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000 мм.

Ниже приведен перечень стандартов (ГОСТов), которыми следует руководствоваться при проектировании и эксплуатации электрических машин.

Таблица 2.1. Номинальные напряжения (В), применяемые в электрических машинах напряжением до 1000 В

Генераторы			Двигатели		
постоянного тока	переменного тока		постоянного тока	переменного тока	
	однофазные	трехфазные		однофазные	трехфазные
28,5	42	42	27	40	40
115		230	110	220	220
230	230	400	220	380	380
460		690	440	660	660

Примечание. Для трехфазного тока указаны линейные напряжения.

ГОСТ 183—74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования.

ГОСТ Р 533—2000. Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия.

ГОСТ 2479—79. Машины электрические вращающиеся. Условные обозначения конструктивных исполнений по способу монтажа.

ГОСТ 2582—81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия.

ГОСТ 4541—70. Машины электрические вращающиеся. Обозначения буквенные установочно-присоединительных и габаритных размеров.

ГОСТ 7217—87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний.

ГОСТ 8592—79. Машины электрические вращающиеся. Допуски на установочные и присоединительные размеры и методы контроля.

ГОСТ 10159—79. Машины электрические вращающиеся коллекторные. Методы испытаний.

ГОСТ 10683—73. Машины электрические. Номинальные частоты вращения и допускаемые отклонения.

ГОСТ 11828—86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний.

ГОСТ 12126—86. Машины электрические малой мощности. Установочные и присоединительные размеры.

ГОСТ 12139—84. Машины электрические вращающиеся. Ряды номинальных мощностей, напряжений и частот.

ГОСТ 13267—73. Машины электрические и непосредственно соединяемые с ними неэлектрические. Высоты оси вращения.

ГОСТ 15150—69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения, транспортировки в части воздействия климатических факторов внешней среды.

ГОСТ 15543—70. Изделия электротехнические. Исполнения для разных климатических районов. Условия эксплуатации

в части воздействия климатических факторов внешней среды.

ГОСТ 15963—79. Изделия электротехнические для районов с тропическим климатом. Общие технические условия.

ГОСТ 16264.0—85. Машины электрические малой мощности. Двигатели. Общие технические условия.

ГОСТ 16372—93. Машины электрические вращающиеся. Допустимые уровни шума.

ГОСТ 18200—90. Машины электрические вращающиеся мощностью свыше 200 кВт. Двигатели синхронные. Общие технические условия.

ГОСТ 18709—73. Машины электрические вращающиеся средние. Установочно-присоединительные размеры.

ГОСТ 20459—87. Машины электрические вращающиеся. Методы охлаждения.

ГОСТ 20815—93. Система стандартов по вибрации. Машины электрические вращающиеся. Методы оценки вибрации.

ГОСТ 20839—75. Машины электрические вращающиеся с высотой оси вращения от 450 до 1000 мм. Установочно-присоединительные размеры.

ГОСТ 26772—85. Машины электрические вращающиеся. Обозначение выводов и направление вращения.

ГОСТ 27471—87. Машины электрические вращающиеся. Термины и определения.

ГОСТ 27917—88. Машины электрические вращающиеся. Встроенная температурная защита. Термодетекторы и вспомогательная аппаратура управления, используемые в системах температурной защиты.

ГОСТ 28173—89. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и рабочие характеристики.

ГОСТ 28327—89. Машины электрические вращающиеся. Пусковые характеристики односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором напряжением до 660 В включительно.

ГОСТ Р 51677—2000. Машины электрические асинхронные мощностью от 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Показатели энергоэффективности.

ГОСТ Р 51689—2000. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно. Общие технические требования.

2.3. Нагревание электрических машин

Как было отмечено (см. 1.3), потери, сопровождающие процессы взаимного преобразования электрической и механической энергий в электрической машине, преобразуются в теплоту, которая частично идет на нагревание машины, а частично рассеивается с поверхности машины в окружающую среду.

Условно принято считать, что нагрев происходит равномерно по всему объему машины, а рассеивание теплоты происходит равномерно со всей ее поверхности. В этих условиях уравнение теплового баланса имеет вид

$$qdt = mc dt + S\lambda \tau dt,$$

где q — количество теплоты, выделяемой в машине в единицу времени:

$$q = Q/dt = \sum P;$$

$\sum P$ — суммарные потери мощности в двигателе, Вт; $mc dt$ — количество теплоты, расходуемой на нагревание машины; m — масса нагреваемого двигателя; c — удельная теплоемкость материала машины, т. е. количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг этого материала на 1 °С; τ — превышение температуры нагрева машины над температурой окружающей среды; $S\lambda \tau$ — количество теплоты, рассеиваемой с поверхности машины в окружающее пространство в единицу времени; λ — коэффициент теплового рассеяния, т. е. количество теп-

лоты, рассеиваемой с единицы поверхности двигателя в 1 с при превышении температуры на 1 °С.

В начальный период работы машина имеет температуру нагрева, не отличающуюся от температуры окружающей среды θ_1 , т. е. $\tau = 0$. В этом случае рассеяния теплоты в окружающую среду не происходит, т. е. $S\lambda \tau dt = 0$, и вся выделяемая в машине теплота идет на ее нагревание. Затем, когда температура нагрева машины начинает превышать температуру окружающей среды, т. е. $\tau > 0$, часть теплоты, выделяемой в машине, начинает рассеиваться в окружающую среду. И наконец, когда температура нагрева машины достигает установившегося значения $\theta_{уст} = \text{const}$, вся выделяемая в машине теплота рассеивается в окружающую среду, т. е. наступает режим теплового равновесия:

$$qdt = S\lambda \tau_{уст} dt,$$

где

$$\tau_{уст} = \theta_{уст} - \theta_1.$$

Установившаяся температура перегрева, °С,

$$\tau_{уст} = q/(S\lambda).$$

Из этого выражения следует:

■ установившаяся температура перегрева не зависит от массы m электрической машины, а определяется количеством теплоты q , выделяемой в единицу времени, которое эквивалентно мощности потерь $\sum P$;

■ установившаяся температура перегрева обратно пропорциональна площади охлаждаемой поверхности S и коэффициенту теплового рассеяния λ , т. е. зависит от интенсивности охлаждения машины — у электрических машин со специальными способами охлаждения (искусственно вентилируе-

ных) $\tau_{уст}$ меньше, чем у машин с естественным охлаждением (при их одинаковых конструкции и условиях работы).

Если машина включается в сеть, когда ее температура равна температуре окружающей среды θ_1 , то зависимость температуры перегрева этой машины τ от времени t выражается равенством

$$\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-t/T_n}),$$

где $e = 2,718$ — основание натуральных логарифмов; T_n — *постоянная времени нагревания*, показывающая время (с), необходимое для нагревания машины до установившейся температуры, если бы не было теплового рассеяния с ее поверхности.

График нагревания $\tau = f(t)$ представляет собой экспоненциальную кривую, которая показывает, что двигатель нагревается до установившейся температуры перегрева $\tau_{уст}$ лишь спустя продолжительное время (рис. 2.3, а). Процесс нагревания сначала идет интенсивно, а затем, по мере приближения к установившейся температуре перегрева, замедляется. Теоретически машина достигает установившейся температуры перегрева $\tau_{уст}$ за время $t = \infty$.

Проведя касательную к графику нагревания в его начальной части, получим отрезок, который в масшта-

бе времени определяет постоянную времени нагревания T_n .

Таким образом, физически величину T_n можно рассматривать как время, в течение которого превышение температуры достигло бы установившегося значения $\tau_{уст}$, если бы график нагревания представлял собой прямую линию, проведенную касательно к начальной части графика нагревания.

Принято считать, что в реальных условиях температура перегрева электрической машины достигает установившегося значения за время нагревания $t = (4-5)T_n$.

Если машину отключить от сети, прекратив этим ее дальнейшее нагревание, то тепловое рассеяние с ее поверхности будет происходить за счет накопленной в ней теплоты. При этом температура перегрева двигателя будет понижаться до $\tau = 0$, т. е. пока температура машины не станет равной температуре окружающей среды. Этот процесс остывания протекает по графику охлаждения (рис. 2.3, б), построенному по уравнению

$$\tau = \tau_{уст}e^{-t/T_o},$$

где T_o — *постоянная времени охлаждения*, с.

Принято считать, что температура перегрева двигателя достигает практически нулевого значения за время охлаждения $t = (4-5)T_o$.

Таким образом, постоянные времени нагревания и охлаждения характеризуют скорость тепловых процессов. Например, машина нагревается тем быстрее, чем меньше постоянная времени нагревания.

Итак, в процессе работы электрической машины нагреваются все ее детали и узлы. Наиболее чувствительна к перегреву электрическая изоля-

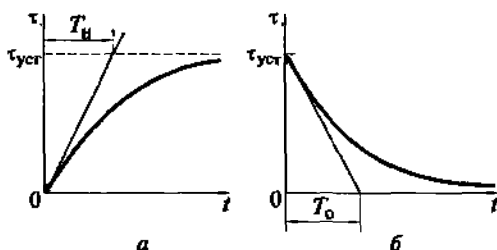


Рис. 2.3. Графики нагревания (а) и охлаждения (б) электрической машины

Таблица 2.2. Предельно допустимые превышения температуры частей электрических машин при температуре газовой среды 40 °С и высоте над уровнем моря более 1000 м

Изоляционный материал класса нагревостойкости												
№ п/п	Части электрических машин	А		Е		В		F		H		
		Предельно допустимые превышения температур, °C, при измерении										
		методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов, уложенных в паз	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов, уложенных в паз	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов, уложенных в паз	методом термометра	
1	Обмотки переменного тока машин мощностью 5000 кВ·А и выше или с длиной сердечника 1 м и более	—	60	—	70	80	80	—	100	160	—	125
2	Обмотки: а) переменного тока машин мощностью менее 5000 кВ·А с длиной сердечника менее 1 м б) возбуждения машин постоянного и переменного тока с возбуждением постоянным током, кроме указанных в пп. 3—5 настоящей таблицы в) якорные, соединенные с коллектором	50	60	—	65	75	—	80	85	100	105	125
3	Обмотки возбуждения неявнополюсных машин с возбуждением постоянным током	—	—	—	—	—	90	—	110	—	—	135

4	Одноякорные обмотки возбуждения с оголенными поверхностями	65	65	—	80	80	—	90	90	—	110	110	—	135	135	—
5	Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев, и компенсационные обмотки	60	60	—	75	75	—	80	80	—	100	100	—	125	125	—
6	Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	60	—	—	75	—	—	80	—	—	100	—	—	125	—	—
7	Неизолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	Превышение температуры этих частей не должно достигать значений, которые создавали бы опасность повреждения самих элементов или соседних частей														
8	Сердечники и другие стальные части, не соприкасающиеся с изолированными обмотками	60	—	60	75	—	75	80	—	80	100	—	100	125	—	125
9	Сердечники и другие стальные части, соприкасающиеся с изолированными обмотками	60	—	—	70	—	—	80	—	—	90	—	—	100	—	—
10	Коллекторы и контактные кольца незащищенные и защищенные	60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечания: 1. Для стержневых обмоток ротора асинхронных машин допускается по согласованию с заказчиком иметь превышения температуры по п. 4. 2. Превышения температуры, указанные в п. 9, не должны превосходить допустимых значений для соприкасающихся обмоток.

ция обмоток. Под действием температур, превышающих допустимые значения, ускоряется процесс теплового старения изоляции, ухудшающий ее изоляционные и механические свойства.

Электроизоляционные материалы, применяемые в электротехнических изделиях, разделяются на семь классов нагревостойкости, обозначаемых Y, A, E, B, F, H и C. При этом каждому классу соответствует своя предельно допустимая температура нагревания:

Класс нагревостойкости	Y
Предельно допустимая температура, °C.....	90

Температура нагрева какой-либо части машины θ_2 при известной температуре ее перегрева $\tau_{\text{уст}}$ и температуре окружающей среды $\theta_1 = 40^\circ\text{C}$:

$$\theta_2 = \tau_{\text{уст}} + \theta_1 = \tau_{\text{уст}} + 40.$$

Для электрических машин специального назначения, работающих в условиях повышенной температуры окружающей среды, например в условиях металлургического производства, температуру θ_1 принимают равной более 40°C .

Действующим стандартом (ГОСТ 183—74) установлены предельно допустимые температуры перегрева для частей машины при разных способах измерения (табл. 2.2).

2.4. Способы охлаждения электрических машин

По способам охлаждения электрические машины разделяют на два вида: машины с естественным охлаждением и машины с искусственным охлаждением.

Естественное охлаждение электрических машин. Эти машины не имеют

вентиляторов или каких-либо других устройств, способствующих охлаждению машины. Охлаждение происходит естественным путем за счет теплопроводности и конвекции.

Теплопроводность — это передача теплоты внутри твердого тела от более нагретых к менее нагретым слоям. Например, пазовые части обмотки статора, нагреваясь, передают теплоту через слои пазовой изоляции в сердечник. Через места крепления сердеч-

A	E	B	F	H	C
105	120	130	155	180	>180

ника теплота передается в корпус статора.

Конвекция состоит в том, что частицы газа (воздуха), соприкасающиеся с поверхностью нагретого тела (лобовые части обмоток, сердечники, корпус), нагреваются, становятся легче и поднимаются вверх, уступая место менее нагретым частицам, и т.д. Такую конвекцию называют *естественной*. Во вращающейся машине имеет место еще и *искусственная* конвекция, обусловленная вращением ротора, который создает принудительную циркуляцию газа (воздуха), что усиливает эффект конвекции внутри машины.

Искусственное охлаждение электрических машин. В этих машинах применяют специальное устройство, обычно вентилятор, создающий направленное движение газа, охлаждающего нагретые части машины. Значительную группу машин с искусственным охлаждением составляют машины с *самовентиляцией*, у которых вентилятор закреплен на собственном валу машины; в процессе работы он, вращаясь, создает аэродинамический напор. Самовентиляция может быть наружной и внутренней.

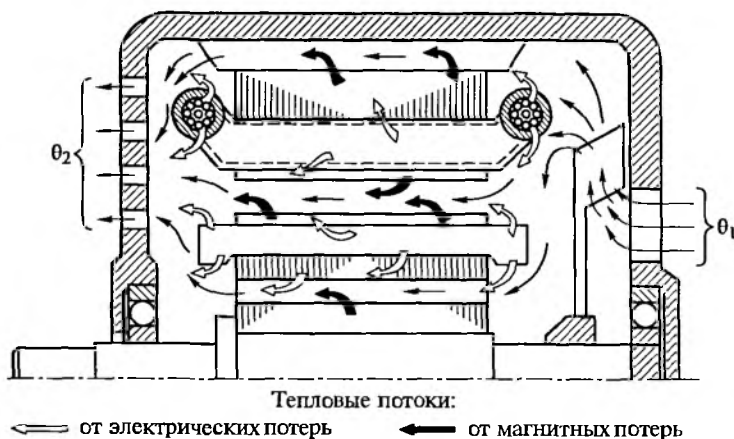


Рис. 2.4. Принцип внутренней самовентиляции электрической машины

При *наружной* самовентиляции воздухом обдувается внешняя поверхность корпуса статора. Машина в этом случае имеет закрытое исполнение с ребристой поверхностью (для увеличения поверхности охлаждения).

При *внутренней* самовентиляции в корпусе и подшипниковых щитах машины делают специальные отверстия, через которые воздух из окружающей машину среды проникает внутрь машины, охлаждает ее, а затем выбрасывается наружу.

Принцип внутренней самовентиляции, получивший применение в электрических машинах, иллюстрирует рис. 2.4. На валу машины закреплен центробежный вентилятор. Вращаясь вместе с валом машины, он затягивает через отверстие в правом подшипниковом щите воздух, создавая внутри машины аэродинамический напор, под действием которого воздух прогоняется через внутреннюю полость машины. Воздух проходит через вентиляционные каналы, зазор и межполюсное пространство (при явнополюсной конструкции машины). При этом он «омывает» нагретые части машины и отбирает у них теплоту и нагретым

выходит через специальные отверстия (жалюзи) в левом подшипниковом щите со стороны, противоположной вентилятору.

Для более эффективного охлаждения в магнитопроводе некоторых электрических машин делают *вентиляционные каналы*, через которые проходит охлаждающий газ. Вентиляционные каналы называют *аксиальными*, если они расположены параллельно оси машины, и *радиальными*, если они расположены перпендикулярно этой оси. Вентиляцию, при которой охлаждающий газ перемещается вдоль оси машины, называют *аксиальной* (рис. 2.5, а), если же газ перемещается перпендикулярно оси машины по радиальным каналам, то вентиляцию называют *радиальной* (рис. 2.5, б).

Радиальные вентиляционные каналы получают делением общей длины сердечника на пакеты по 40—60 мм. Между пакетами оставляют промежутки по 10 мм, которые и являются радиальными каналами. Иногда в машинах применяют *радиально-аксиальную* вентиляцию. В двигателях с регулируемой частоты вращения «вниз» от номинальной при малой частоте враще-

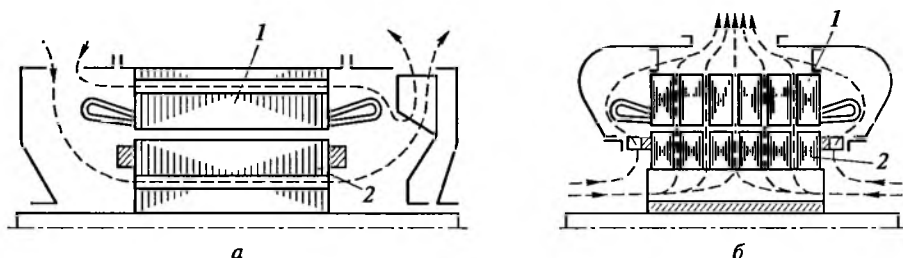


Рис. 2.5. Аксиальная (а) и радиальная (б) системы вентиляции:

1 — статор; 2 — ротор

ния самовентиляция становится малоэффективной, что ведет к чрезмерному перегреву машины. Поэтому в таких двигателях целесообразно применение *независимой* вентиляции, когда вентилятор имеет собственный привод (частота вращения последнего не зависит от режима работы машины).

Независимую вентиляцию применяют также для охлаждения электрических машин, работающих во взрывоопасной или химически активной среде. В этом случае вентилятор 4 (рис. 2.6, а) через трубопровод 3 нагнетает воздух в машину 1 и по трубе 2 выбрасывает его наружу. Такая система независимой вентиляции называется *разомкнутой* в отличие от *замкнутой* системы (рис. 2.6, б). Один

и тот же объем газа циркулирует в замкнутой системе, состоящей из двигателя (объект охлаждения) 1, независимого вентилятора 2, трубопроводов 3 и 5 и радиатора охлаждаителя 4. Проходя через радиатор 4, нагретый в машине газ охлаждается посредством холодной воды, проходящей через радиатор (пунктирные стрелки на рис. 2.6, б).

Все способы охлаждения электрических машин принято обозначать буквами IC, являющимися начальными буквами английских слов International Cooling, остальные буквы и цифры обозначают способ охлаждения машины. Сначала указывается буква, обозначающая вид хладагента: А — воздух, Н — водород, W — вода и т.д.

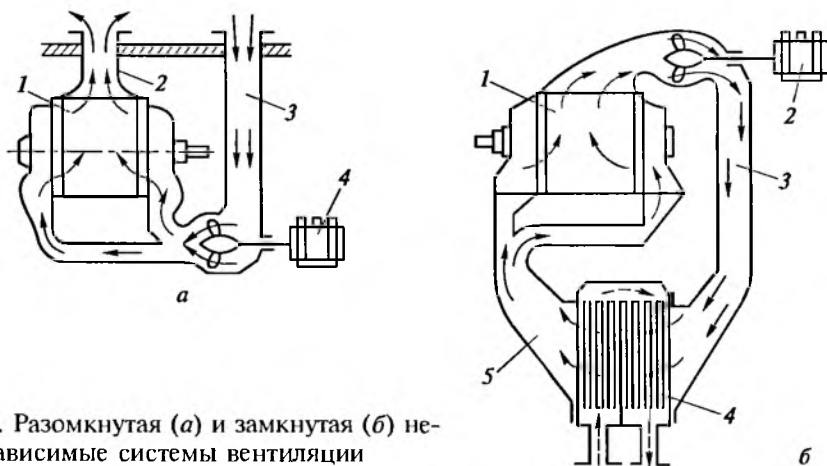


Рис. 2.6. Разомкнутая (а) и замкнутая (б) независимые системы вентиляции

Если хладагентом является только воздух, то буква опускается.

Затем идет несколько цифр: первая цифра условно обозначает устройство цепи охлаждения для циркуляции хладагента, например воздуха:

0 — хладагент свободно поступает в электрическую машину и свободно выводится из нее;

3 — хладагент поступает в машину через подводящую трубу и выводится из нее через отводящую трубу;

4 — хладагент циркулирует в замкнутом объеме машины и отдает свою теплоту через поверхность корпуса машины (обычно ребристую) в окружающую среду;

7 — хладагент циркулирует по замкнутой системе, включающей охладитель, и отдает свою теплоту хладагенту охладителя, встроенного в машину;

8 — то же, что и 7, но охладитель установлен вне машины.

Вторая цифра обозначает способ перемещения хладагента:

0 — хладагент перемещается за счет свободной конвекции, вентилирующее действие ротора незначительно;

1 — хладагент перемещается с помощью вентилятора, расположенного на валу машины;

2 — хладагент перемещается с помощью вентилятора, расположенного не на валу машины, но вращаемого этим валом через передающее устройство, например зубчатую передачу;

3 — то же, что и 2, но вентилятор вращается отдельным двигателем, получающим питание от выводов охлаждаемой машины;

7 — хладагент перемещается с помощью независимого вентилятора, установленного вне охлаждаемой машины и включенного в сеть, независимо от нее;

8 — хладагент перемещается внутри машины за счет движения машины через хладагент, например тяговый двигатель.

Если машина имеет несколько цепей охлаждения (например, внутренняя

вентиляция и наружный обдув), то в обозначении может быть четыре цифры: две — для обозначения наружной цепи охлаждения и две — для внутренней.

Рассмотрим примеры некоторых наиболее применяемых способов охлаждения электрических машин.

А. Разомкнутые системы охлаждения:

IC01 — защищенная машина с внутренней самовентиляцией, вентилятор расположен на валу машины;

IC31 — защищенная машина с самовентиляцией, вентилятор расположен на валу машины, воздух поступает в машину и удаляется из нее с помощью подводящей и отводящей труб;

IC37 — защищенная машина с принудительной вентиляцией, воздух поступает в машину и удаляется из нее с помощью подводящей и отводящей труб, вентилятор приводится во вращение отдельным двигателем;

IC0040 — закрытая машина с естественным охлаждением без внешнего вентилятора;

IC0141 — закрытая машина с самовентиляцией, ребристая или гладкая поверхность станины обдувается снаружи внешним вентилятором, расположенным на валу машины.

Б. Замкнутые системы охлаждения:

ICW37A81 — замкнутая система самовентиляции воздухом, водяной охладитель встроен в охлаждаемую машину;

ICW37A97 — замкнутая система принудительной вентиляции воздухом, водяной охладитель установлен отдельно от охлаждаемой машины;

ICW37A91 — замкнутая система самовентиляции воздухом, водяной охладитель установлен в фундаментной яме;

ICW37A86 — замкнутая система принудительной вентиляции воздухом, водяной охладитель установлен непосредственно на машине.

Применяемые в электрических машинах способы охлаждения находятся во взаимосвязи с конструктивными формами исполнения этих машин.

2.5. Конструктивные формы исполнения электрических машин

Конструктивные формы исполнения электрических машин определяются степенью защиты, способами охлаждения и монтажа, воздействием климатических факторов окружающей среды и категорией мест размещения электрических машин при эксплуатации.

Степени защиты электрических машин для обслуживающего персонала и от попадания внутрь твердых тел и воды регламентированы ГОСТ 17494—72. Условное обозначение степени защи-

ты состоит из двух букв IP (начальные буквы английских слов International protection) и двух цифр. *Первая цифра* обозначает степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями и от попадания внутрь машины твердых тел; *вторая цифра* обозначает степень защиты от проникновения воды внутрь машины.

Для обозначения степеней защиты электрических машин напряжением до 1000 В применяют цифры (табл. 2.3).

В табл. 2.4 представлены степени защиты, применяемые в современных электрических машинах напряжением до 1000 В.

Таблица 2.3. Цифры в обозначении степеней защиты электрических машин

Номер цифры	Цифра	Степень защиты
Первая цифра	0	Специальная защита отсутствует
	1	Защита от проникновения твердых тел диаметром более 50 мм, исключено случайное прикосновение к токоведущим или движущимся частям внутри оболочки частью тела, например рукой
	2	Защита от проникновения твердых тел диаметром более 12 мм, исключено прикосновение пальцами к опасным частям внутри оболочки
	3	Защита от проникновения инструментов, проволоки и т. д. диаметром или толщиной более 2,5 мм
	4	Защита от проникновения твердых тел размером свыше 1 мм
	5	Защита от пыли. Пыль внутрь оболочки не может проникать в количестве, нарушающем работу изделия
Вторая цифра	0	Защита отсутствует
	1	Защита от вертикально падающих капель воды
	2	Защита от капель воды при наклоне оболочки до 15°
	3	Защита от дождя под углом до 60°
	4	Защита от брызг в любом направлении
	5	Защита от водяных струй в любом направлении
	6	Защита от воздействия морских волн
	7	Защита при кратковременном погружении в воду на определенную глубину
	8	Защита при длительном погружении в воду при условиях, определяемых изготовителем

Таблица 2.4. Условные обозначения и описания степеней защиты электрических машин

Условное обозначение	Характеристика степени защиты
IP00	Машина, не имеющая специальной защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины, защиты от попадания твердых тел внутрь корпуса, защиты от проникновения воды
IP01	Машина, защищенная от капель воды, падающих вертикально на оболочку и не имеющая специальной защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины, защита от попадания твердых тел внутрь корпуса
IP10	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела (например, руки), от проникновения твердых тел размером более 50 мм, защита от проникновения воды отсутствует
IP11	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела (например, руки), от проникновения твердых тел размером более 50 мм и от капель воды, падающих вертикально на оболочку
IP12	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела (например, руки), от проникновения твердых тел размером более 50 мм и от капель воды, падающих вертикально на оболочку при наклоне оболочки на любой угол до 15° относительно нормального положения
IP13	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела (например, руки), от проникновения твердых тел размером более 50 мм и от капель воды, падающих на оболочку под углом 60° от вертикали
IP20	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной более 80 мм, от проникновения твердых тел размером свыше 12 мм, защита от проникновения воды отсутствует
IP21	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной более 80 мм, от проникновения твердых тел размером свыше 12 мм и капель воды, падающих вертикально на оболочку
IP22	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной более 80 мм, от проникновения твердых тел размером свыше 12 мм и капель воды, падающих вертикально на оболочку при наклоне оболочки на любой угол до 15° относительно нормального положения
IP23	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной более 80 мм, от проникновения твердых тел размером свыше 12 мм и капель воды, падающих на оболочку под углом 60° от вертикали
IP43	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки проволоки и твердых тел размером более 1 мм и капель воды, падающих на оболочку под углом 60° от вертикали
IP44	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки проволоки и твердых тел размером более 1 мм и от воды, разбрызгиваемой на оболочку в любом направлении

Окончание табл. 2.4

Условное обозначение	Характеристика степени защиты
IP54	Машина, не полностью защищенная от проникновения внутрь оболочки пыли (однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы изделия) и от воды, разбрызгиваемой на оболочку в любом направлении
IP55	Машина, не полностью защищенная от проникновения внутрь оболочки пыли (однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы изделия) и защищенная от струй воды, попадающих на оболочку в любом направлении
IP56	Машина, не полностью защищенная от проникновения внутрь оболочки пыли (однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы изделия) и защищенная от волн воды (вода при волнении не попадает внутрь оболочки в количестве, достаточном для повреждения)

Способы охлаждения электрических машин рассмотрены в 2.4. Опытом проектирования и эксплуатации электрических машин определена увязка способов защиты со способами охлаждения электрических машин. Например, в машинах защищенного исполнения IP22 и IP23 обычно применяют способ охлаждения IC01, а для закрытых машин IP44, IP54 и IP55 — способ охлаждения IC0141. Но как для машин защищенного, так и для закрытого исполнений возможно применение независимой (принудительной) вентиляции.

Способы монтажа. Монтаж электрических машин определяет способ крепления электрической машины в месте ее установки и способ ее сочленения с рабочим механизмом. Монтаж машин в большинстве случаев осуществляется на лапах или посредством фланцев. При этом возможно горизонтальное или вертикальное расположение вала машины. Разновидности конструктивного исполнения электрических машин по способу монтажа определяются ГОСТ 2479—79.

Условное обозначение исполнения машины по способу монтажа состоит из букв IM (начальные буквы слов International Mounting) и четырех цифр.

Первая цифра обозначает группу конструктивного исполнения:

- 1 — на лапах с подшипниковыми щитами;
- 2 — на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном или двух щитах;
- 3 — без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном или двух щитах;
- 4 — без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине;
- 5 — без подшипниковых щитов;
- 6 — на лапах с подшипниковыми щитами со стоячковыми подшипниками;
- 7 — на лапах со стоячковыми подшипниками (без подшипниковых щитов);
- 8 — с вертикальным валом, кроме позиций 1, 2, 3 и 4 данного перечня;
- 9 — специальное исполнение по способу монтажа.

Вторая и третья цифры обозначают способ монтажа: пространственное положение машины и направление выступающего конца вала, причем если третья цифра 8, то машина мо-

жет работать при любом пространственном положении вала.

Четвертая цифра обозначает количество и форму исполнения выступающих концов вала:

- 0 — без выступающего конца вала;
- 1 — с одним выступающим концом вала цилиндрической формы;
- 2 — с двумя выступающими концами вала цилиндрической формы;
- 3 — с одним выступающим концом вала конической формы;
- 4 — с двумя выступающими концами вала конической формы;
- 5 — с одним выступающим фланцевым концом вала;

6 — с двумя выступающими фланцевыми концами вала;

7 — с двумя выступающими концами вала: со стороны привода — фланцевым, а с противоположной стороны — цилиндрическим;

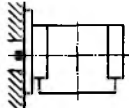
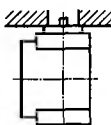
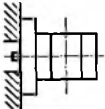
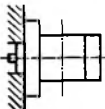
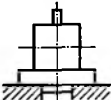
8 — все прочие исполнения выступающих концов вала.

Примеры наиболее распространенных видов исполнения электрических машин по способу монтажа приведены в табл. 2.5, а в табл. 2.6 показаны виды конструктивных исполнений электрических машин с разными способами их монтажа и крепления.

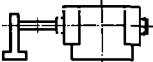
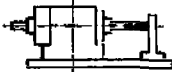
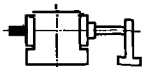
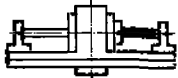
Таблица 2.5. Примеры условных обозначений конструктивного исполнения электрических машин по способу монтажа

Условное обозначение	Характеристика исполнения по способу монтажа
IM1001	Машина на лапах с двумя подшипниковыми щитами и одним цилиндрическим концом вала
IM2003	Машина на лапах с фланцем, доступным с обратной стороны, на одном подшипниковом щите и с одним коническим концом вала
IM3011	Машина с двумя подшипниковыми щитами, с фланцем, доступным с обратной стороны, опорная плоскость фланца обращена к стороне выступающего цилиндрического конца вала
IM5706	Машина на приподнятых лапах и опорных плитах со станиной, ротором и валом, с двумя фланцевыми концами вала
IM5710	Машина на приподнятых лапах и опорных плитах со станиной и ротором без выступающего конца вала
IM6505	Машина с двумя подшипниковыми щитами, на лапах с двумя стоячковыми подшипниками, без фундаментной плиты, с одним фланцевым концом вала
IM7311	Машина на приподнятых лапах с двумя стоячковыми подшипниками, фундаментной плитой и одним цилиндрическим концом вала
IM7312	Машина на приподнятых лапах с двумя стоячковыми подшипниками, фундаментной плитой и двумя цилиндрическими концами вала
IM7315	Машина на приподнятых лапах с двумя стоячковыми подшипниками, фундаментной плитой и одним фланцевым концом вала
IM7321	Машина на приподнятых лапах с двумя стоячковыми подшипниками, опорной плитой и одним цилиндрическим концом вала
IM7325	Машина на приподнятых лапах с одним стоячковым подшипником, опорной плитой и одним фланцевым концом вала

Таблица 2.6. Виды конструктивных исполнений электрических машин с разными способами их монтажа

Группа исполнения	Конструктивное исполнение	Обозначение
IM1 Машины на лапах с подшипниковыми щитами	С двумя подшипниковыми щитами, на лапах, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM1001 
	То же, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вниз	IM1011 
IM2 Машины на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах)	На лапах, с фланцем на одном подшипниковом щите, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM2001 
	На лапах, с фланцем на одном подшипниковом щите, не доступным с обратной стороны, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вверх	IM2131 
IM3 Машины без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите (или щитах)	С двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на стороне выступающего конца вала, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM3001 
IM4 Машины без лап с фланцем на станине	С двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на стороне выступающего конца вала, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM4001 
	С одним подшипниковым щитом, с фланцем на стороне, противоположной выступающему концу вала, доступным с обратной стороны, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вверх	IM4731 
IM5 Машины без подшипниковых щитов	Без станины, с ротором и горизонтальным валом с цилиндрическим концом	IM5001 

Окончание табл. 2.6

Группа исполнения	Конструктивное исполнение	Обозначение
IM5 Машины без подшипниковых щитов	Со станиной на лапах, с ротором, без вала	IM5410 
IM6 Машины с подшипниковыми щитами и стояковыми подшипниками	На лапах с двумя подшипниковыми щитами, с одним стояковым подшипником на стороне выступающего конца вала, без фундаментальной плиты	IM6000 
	Со станиной на лапах с фундаментальной плитой, с одним стояковым подшипником на стороне, противоположной выступающему концу вала, с одним подшипниковым щитом	IM6211 
IM6 Машины со стояковыми подшипниками (без подшипниковых щитов)	Без фундаментной или опорной плиты, станина на лапах, с одним стояковым подшипником	IM7001 
	С фундаментной плитой на приподнятых лапах, с двумя стояковыми подшипниками	IM7610 

На надежность электрических машин при их эксплуатации значительное влияние оказывают **климатические условия** внешней среды (ГОСТ 15150—69), к которым относятся: температура и диапазон ее колебания, относительная влажность, атмосферное давление, солнечная радиация, дождь, ветер, пыль, соляной туман, иней, действие плесневых грибов, содержание в окружающей среде коррозионно-активных материалов. Климатическое исполнение двигателей обозначается буквами (табл. 2.7).

Электрические машины общего назначения обычно предназначены для работы на высоте над уровнем моря до 1000 м.

Установлены категории мест размещения электрооборудования при эксплуатации (табл. 2.8).

ГОСТ 15150—69 увязывает климатическое исполнение электрических машин и категории размещения с допускаемыми значениями температуры окружающей среды и влажности воздуха (табл. 2.9).

В реальных условиях возможна эксплуатация электрических машин при превышении установленных стандартом климатических условий. Например, если электрическая машина общего назначения эксплуатируется при температуре окружающей среды, *превышающей* значения, указанные в табл. 2.9, то номинальная мощность

Таблица 2.7. Условные обозначения климатического исполнения электрических машин

Условное обозначение	Характеристика климатического исполнения
<i>Электрические машины, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озерах в макроклиматических районах</i>	
У	С умеренным климатом
ХЛ	С холодным климатом
УХЛ	С умеренным и холодным климатом
ТВ	С влажным тропическим климатом
ТС	С сухим тропическим климатом
Т	С сухим и влажным тропическим климатом
О	Для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение)
<i>Электрические машины, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с морским климатом</i>	
М	С умеренно-холодным морским климатом
ТМ	С морским тропическим климатом, в том числе и на судах каботажного плавания
ОМ	На судах неограниченного района плавания
В	Для всех макроклиматических районов на суше и на море

Таблица 2.8. Категории размещения электрических машин

Условное обозначение	Характеристика категорий размещения
1	Для эксплуатации на открытом воздухе (воздействие совокупности климатических факторов, характерных для данного микроклиматического района)
2	Для эксплуатации под навесом или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха, а также отсутствует прямое воздействие солнечного излучения и атмосферных осадков
3	Для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры, влажности воздуха и воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе
4	Для эксплуатации в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями
5	Для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью (например, в неотапливаемых и неventилируемых помещениях, в том числе в шахтах)

Таблица 2.9. Увязка климатических исполнений электрических машин с категориями их размещения

Климатическое исполнение	Категория размещения	Температура, °С		Максимальное значение относительной влажности, %
		верхнее значение	нижнее значение	
У	1, 2	+40	−45	100 при 25 °С
У	3	+40	−45	98 при 25 °С
У	4	+35	+1	80 при 25 °С
Т	2	+50	−10	100 при 35 °С
УХЛ	4	+40	−50	100 при 25 °С
ХЛ	1, 2	+40	−60	100 при 25 °С

машины должна быть уменьшена согласно табл. 2.10.

В электрических машинах, предназначенных для эксплуатации при высоте до 1000 м над уровнем моря, их номинальная мощность должна быть снижена согласно табл. 2.11 при работе на высоте более 1000 м.

На рис. 2.7 показано устройство (продольный разрез) асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 (наружная самовентиляция), а на рис. 2.8 — устройство асинхронного двигателя исполнения по степени защиты IP23; способ охлаждения IC01 (внутренняя самовентиляция). Стрелками показаны направления потоков охлаждающего воздуха. Оба двигателя имеют исполнение по способу монтажа IM1001.

Синхронная машина со стояковыми подшипниками скольжения, со степенью защиты IP44 имеет замкнутую систему самовентиляции с пристроенным водяным охладителем воздуха, способ охлаждения ICW37A81 (рис. 2.9).

В электрических машинах, имеющих дополнительные устройства или специальное назначение, в обозначении типоразмеров применяют дополнительные обозначения в виде буквы:

Б — со встроенной температурной защитой;

В — встраиваемые (поставляемые в виде сердечников статора и ротора с обмотками, без станины и подшипниковых щитов, для встраивания этих элементов непосредственно в рабочий механизм);

Е — (после обозначения габарита) со встроенным тормозом;

Таблица 2.10. Зависимость номинальной мощности электрической машины от температуры окружающей среды

Температура окружающей среды, °С	40	45	50	55	60
Номинальная мощность, %	100	96	92	87	82

Таблица 2.11. Зависимость номинальной мощности электрической машины от высоты над уровнем моря

Высота над уровнем моря, м	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4300
Номинальная мощность, %	100	98	95	92	88	84	80	74

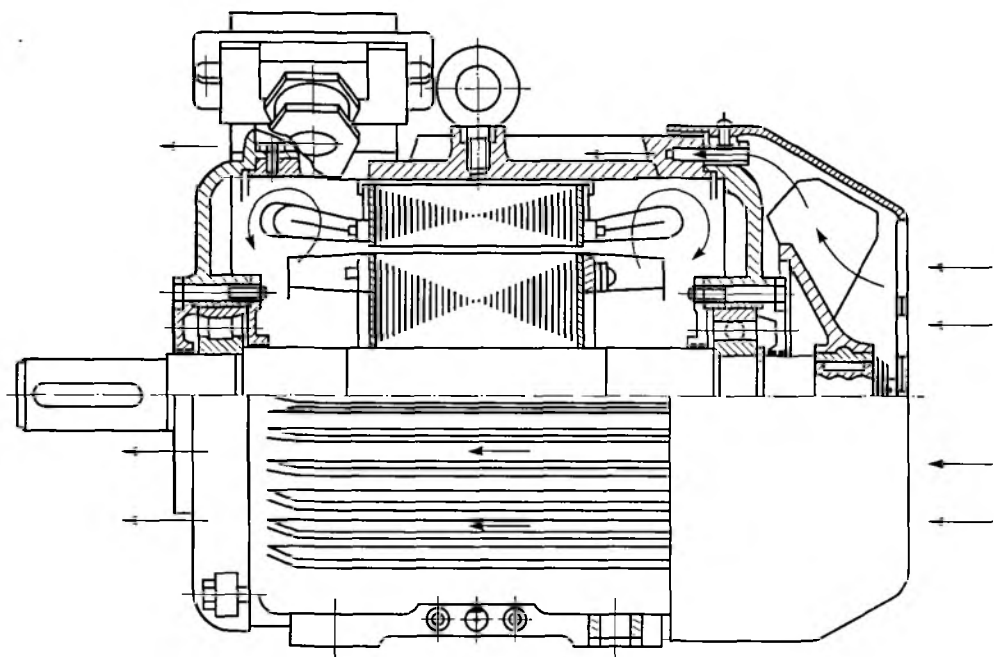


Рис. 2.7. Трехфазный асинхронный двигатель серии 4А исполнения по степени защиты IP44 и способу охлаждения IC0141

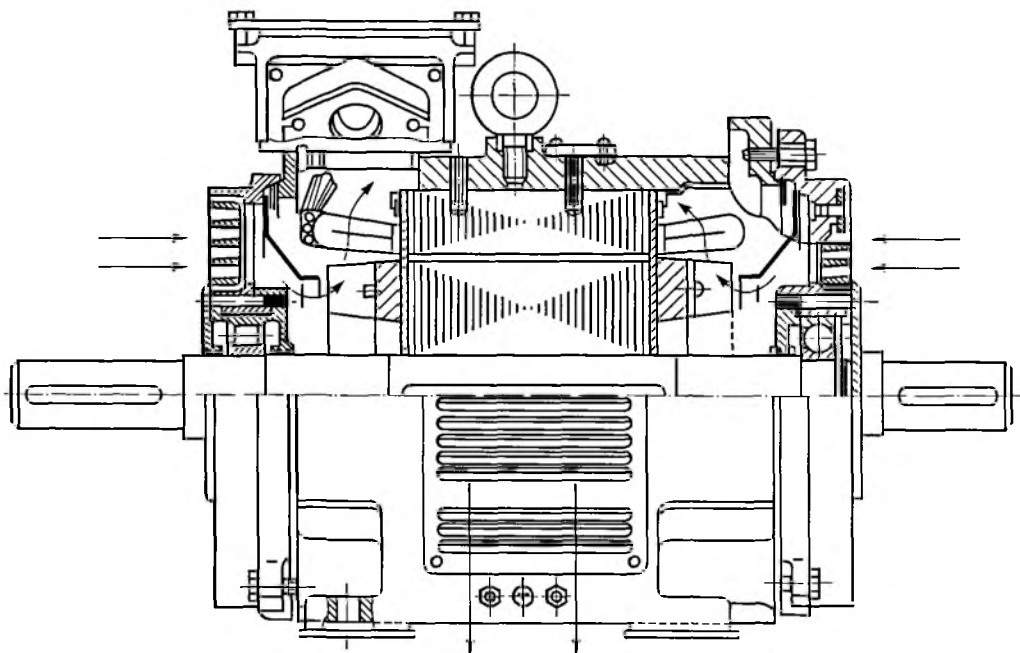


Рис. 2.8. Трехфазный асинхронный двигатель исполнения по степени защиты IP23 и способу охлаждения IC01

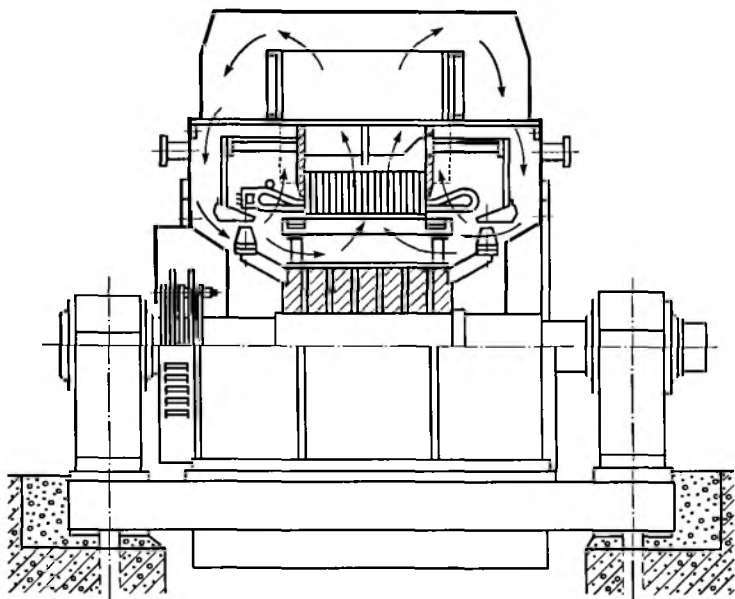


Рис. 2.9. Трехфазный синхронный двигатель со стоячковыми подшипниками исполнения по степени защиты IP44 и способу охлаждения ICW37A81

Е — (перед обозначением габарита) однофазный двигатель;

Ж — с удлиненным валом;

П — повышенной точности к установочным размерам;

Н — маломощное исполнение.

В заключение рассмотрим некоторые термины и определения, установленные ГОСТ 18311—80 «Изделия электротехнические. Термины и определения основных понятий», применительно к видам защиты электрических машин.

1. *Открытая электрическая машина* — машина, не защищенная оболочкой от прикасания к ее частям, находящимся под напряжением, опасным движущимся частям и от попадания внутрь посторонних предметов, жидкости и пыли.

2. *Защищенная электрическая машина* — машина, снабженная оболочкой для защиты от прикасания к ее частям, находящимся под напряжением,

опасным движущимся частям и от попадания внутрь посторонних предметов, жидкости и пыли.

3. *Закрытая электрическая машина* — защищенная машина, выполненная с такой оболочкой, что возможность сообщения между ее внутренним пространством и окружающей средой может иметь место только через неплотности соединения частей машины.

4. *Пылезащищенная электрическая машина* — защищенная машина, выполненная так, что исключается попадание внутрь ее оболочки пыли в количестве, вызывающем нарушение работы машины.

5. *Герметичная электрическая машина* (водонепроницаемая, газонепроницаемая) — защищенная машина, выполненная с такой оболочкой, что практически исключена возможность сообщения между ее внутренним пространством и окружающей средой.

6. *Водозащищенная электрическая машина* — защищенная машина, выполненная так, что при обливании ее водой исключается попадание воды внутрь оболочки в количестве, вызывающем нарушение работы машины.

7. *Взрывозащищенная электрическая машина* — защищенная машина специального назначения, выполненная таким образом, что устранена или затруднена возможность воспламенения окружающей ее взрывоопасной среды вследствие эксплуатации этой машины (см. 7.4).

8. *Погружная электрическая машина* — машина специального назначения, предназначенная для эксплуатации в условиях погружения в жидкость (см. 7.5).

2.6. Материалы, применяемые в электрических машинах

Материалы, применяемые в электрических машинах, разделяют на конструкционные, активные и электроизоляционные.

Конструкционные материалы применяют для изготовления деталей машины, преимущественным назначением которых является восприятие и передача механических нагрузок, а также обеспечение требуемой степени защиты, охлаждения, смены смазки и т.д. (станины, подшипниковые щиты, валы, жалюзи, уплотнители, вентиляторы и др.). В качестве конструкционных материалов используют сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы, пластмассы.

Активные материалы служат для протекания в машине электромагнитных процессов. Эти материалы подразделяют на магнитные и проводниковые.

Магнитные материалы применяют для изготовления магнитопроводов. Одним из основных требований, предъявляемых к магнитным материалам, является высокая магнитная проницаемость, т.е. чтобы требуемый магнитный поток в машине создавался возможно меньшим значением МДС.

Некоторые элементы магнитопроводов электрических машин (сердечники статоров машин переменного тока, якореи машин постоянного тока и т.п.) подвержены перемагничиванию, что вызывает потери энергии на вихревые токи и гистерезис. Поэтому к магнитным материалам, из которых изготовлены такие элементы магнитопроводов, предъявляются еще и требования: минимальные потери от перемагничивания и повышенное удельное электрическое сопротивление, что способствует уменьшению потерь от вихревых токов.

Наилучшим магнитным материалом, удовлетворяющим всем перечисленным требованиям, является тонколистовая электротехническая сталь. Широкий диапазон электромагнитных свойств электротехнической стали достигается изменением содержания кремния. Обычно сталь с меньшим содержанием кремния имеет меньшую магнитную проницаемость и большие удельные потери, но зато и большее допустимое значение магнитной индукции насыщения. С повышением содержания кремния увеличивается хрупкость электротехнической стали, что создает определенные трудности при штамповке (образование трещин в зубцовой зоне). Это обстоятельство ограничивает применение высоколегированных электротехнических сталей для изготовления сердечников при небольших размерах зубцов и пазов. По

способу прокатки электротехнические стали подразделяют на холоднокатаные и горячекатаные.

Обозначение марки электротехнической стали состоит из четырех цифр:

первая цифра указывает на вид прокатки и структурное состояние:

1 — горячекатаная сталь;

2 — холоднокатаная изотропная сталь, имеющая одинаковые магнитные свойства вдоль и поперек направления проката;

3 — холоднокатаная анизотропная сталь, у которой магнитные свойства вдоль направления проката лучше, чем поперек;

вторая цифра указывает на содержание кремния:

0 — до 0,4 %; 1 — 0,4—0,8 %; 2 — 0,8—1,8 %; 3 — 1,8—2,8 %; 4 — 2,8—3,8 %; 5 — 3,8—4,8 %;

третья цифра указывает на группу по удельным магнитным потерям;

четвертая цифра — порядковый номер типа стали.

Элементы магнитопровода, изготавливаемые из листовой электротехнической стали, имеют шихтованную конструкцию, т. е. выполняются в виде пакета выштампованных листов, изолированных друг от друга изоляционной пленкой (лак, оксидная пленка), которая служит для ограничения вихревых токов.

В современных сериях асинхронных двигателей и машин постоянного тока преимущественное применение получили холоднокатаные изотропные стали марок 2013, 2312 и 2411, которые обладают высокими магнитными свойствами, хорошим качеством поверхности, малой разнотолщинностью. Применение этих сталей позволяет существенно улучшить энергетические показатели и уменьшить массу электрических машин.

Для изготовления сердечников главных полюсов применяют листовую конструкционную сталь толщиной

1 или 2 мм либо анизотропную холоднокатаную электротехническую сталь марки 3411 толщиной 1 мм. При изготовлении сердечников из анизотропной стали необходимо, чтобы продольная ось полюса совпадала с направлением проката стали. Применение холоднокатаной стали марки 3411 для сердечников главных полюсов позволяет уменьшить магнитное рассеяние добавочных полюсов и ослабить размагничивающее действие реакции якоря. Объясняется это тем, что магнитный поток обмотки якоря, проходя «поперек» сердечников главных полюсов, т. е. перпендикулярно направлению проката электротехнической стали, испытывает повышенное магнитное сопротивление, что и ведет к уменьшению этого потока.

Станины машин постоянного тока изготавливают из стальных цельнотянутых труб либо их гнут и сваривают из стальных листов марки Ст3. В некоторых случаях станины делают шихтованными из электротехнической стали.

Электроизоляционные материалы весьма разнообразны. Их свойства во многом определяют эксплуатационную надежность, габаритные размеры, массу и стоимость машины.

Одним из важнейших свойств электроизоляционных материалов является нагревостойкость — способность материала сохранять свои электроизоляционные и механические свойства при воздействии рабочих температур в течение времени, определяемого сроком службы электрической машины. Как отмечалось, все электроизоляционные материалы разделены на 12 классов нагревостойкости. Однако в современных электрических машинах применяют изоляционные материалы лишь трех классов В, F и H, облада-

ющие наиболее высокой нагревостойкостью.

Ниже приводится примерный перечень электроизоляционных материалов каждого класса нагревостойкости.

Класс нагревостойкости А. Волокнистые материалы из бумаги, хлопка, шелка, древесины и т.д., пропитанные жидкими диэлектриками либо погруженные в них. К этому классу относятся также изоляция эмальпроводов на основе масляных и полиамидно-резольных лаков, полиамидные пленки, бутилкаучуковые и другие материалы. Пропитывающими веществами для данного класса материалов являются трансформаторное масло, масляные и асфальтовые лаки и другие вещества соответствующей нагревостойкости. К данному классу относятся лакобумаги, лакоткани, пленкоэлектрокартон, гетинакс, текстолит.

Класс нагревостойкости Е. Изоляция эмальпроводов и электроизоляционные материалы на основе полиуретановых, эпоксидных, полиэфирных смол и других синтетических материалов аналогичной нагревостойкости.

Класс нагревостойкости В. Материалы на основе неорганических диэлектриков (слюда, асбест, стекловолокно) и клеящих, пропиточных и покровных лаков и смол повышенной нагревостойкости органического происхождения с содержанием органических веществ по массе не более 50 %. К этому классу относятся материалы на основе щипаной слюды: миканит, микалента, микафолий; различные синтетические материалы: полиэфирные смолы на основе фталевого ангидрида, фторопласт-3, некоторые полиуретановые смолы, пластмассы с неорганическим наполнителем.

Класс нагревостойкости F. Материалы на основе слюды, асбеста и

стекловолокна, но с применением органических лаков и смол, модифицированных кремнийорганическими и другими нагревостойкими смолами. Изоляция этого класса не должна содержать бумаги, целлюлозы и шелка.

Класс нагревостойкости H. Те же материалы, что и в классе F, но с соответствующими по нагревостойкости кремнийорганическими лаками и смолами.

В процессе работы машины изоляция обмоток нагревается неравномерно, при этом измерение температуры нагрева в наиболее горячих точках (граница между токоведущим проводом и его изоляционным покрытием) оказывается технически невозможной. Поэтому согласно действующему стандарту предельные температуры нагревания обмоток принимают несколько ниже предельно допустимых температур для изоляции соответствующего класса нагревостойкости (табл. 2.12).

Чрезмерный перегрев неблагоприятно влияет и на другие элементы машины: подшипники, контактные кольца, коллектор. Например, коллектор при чрезмерном перегреве может утратить цилиндрическую форму.

Эксплуатация изоляционных материалов в соответствии с температурами, указанными для каждого класса нагревостойкости, обеспечивает им длительный срок службы (20—25 лет) без заметной потери изоляционных и механических свойств. Если же материал использовать при температурах, превышающих указанные для соответствующего класса нагревостойкости, то срок службы изоляции резко сокращается. Это объясняется интенсивным тепловым старением материала, сопровождаемым утратой им электроизоляционных свойств и механической прочностью. Экспериментально

Таблица 2.12. Предельно допустимые температуры нагрева для классов нагревостойкости В, F и H

Класс нагревостойкости изоляции	В	F	H
Предельно допустимая температура нагрева изоляции, °C	130	155	180
Предельно допустимая температура нагрева обмоток, °C	120	140	165
Предельно допустимые превышения температуры обмоток (°C) при $\theta_1 = 40^\circ\text{C}$	80	100	125
Расчетная рабочая температура обмотки при расчете ее сопротивления, °C	75	115	115

показано, что при повышении температуры на 10°C сверхустановленной классом нагревостойкости, срок службы изоляции сокращается примерно вдвое. Поэтому важнейшей задачей является правильный выбор типа электрической машины и ее эксплуатация без превышения номинальных данных сверхдопустимых величин и продолжительности. Если же температура частей машины намного ниже допустимой, то машина будет недостаточно использована, а это значит, что ее габаритные размеры и стоимость будут неоправданно завышены. Исключение составляют машины, к которым предъявляются требования повышенной надежности.

Обычно электрическая изоляция обмотки состоит из нескольких видов электроизоляционных материалов, образующих систему изоляции. Непременным условием надежной работы такой системы изоляции является совместимость всех ее составляющих.

Кроме того, изоляционные материалы должны обладать требуемыми теплостойкостью, влажностойкостью, холодостойкостью и т. д.

В современных электрических машинах получили широкое применение *композиционные* электроизоляционные материалы. Такой материал представ-

ляет собой сочетание полимерных пленок с различными гибкими изоляционными материалами на основе синтетических волокон. Указанные компоненты соединяют между собой клеящими составами. Функции компонентов различны: пленка принимает на себя электрическую и механическую нагрузки, а волокнистые материалы придают композиции необходимые технологические свойства — эластичность, упругость, надежную связь между поверхностью пазовой изоляции и прилегающими к ней поверхностью катушек с одной стороны и поверхностью магнитопровода, с другой. Непременным условием при подборе компонентов является их полная совместимость.

В качестве проводниковых материалов в электрических машинах широко применяют электролитическую медь и реже — рафинированный алюминий. Необходимо иметь в виду, что основным параметр меди — электрическая проводимость — в значительной степени зависит от наличия даже небольшого количества примесей. Поэтому медь, предназначенная для обмоточных проводов, не должна содержать более 0,1 % примесей. При холодной протяжке медь подвергается наклепу, становится более твердой и ее удельное электрическое со-

Таблица 2.13. Удельное электрическое сопротивление проводниковых материалов при рабочих температурах электрических машин

Наименование материала	Удельное электрическое сопротивление, 10 ⁻⁶ Ом · м, при температуре, °С			Плотность, 10 ³ кг/м ³
	20	75	115	
Медный провод	0,0175	0,0213	0,0244	0,089
Алюминиевый провод	0,0294	0,0357	0,0400	} 0,0265
Литая алюминиевая клетка	0,0366	0,0465	0,0488	

противление возрастает. Отжиг возвращает меди первоначальные свойства.

Для заливки короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей применяют алюминий. В результате заливки в стержнях и короткозамыкающих кольцах появляются воздушные включения, а при заливке под давлением алюминий приобретает волокнистую структуру. Все это ведет к некоторому увеличению электрического сопротивления клетки ротора.

Известно, что с ростом температуры удельное электрическое сопротивление меди и алюминия увеличивается. В соответствии с ГОСТ 183—74 расчетная рабочая температура принимается равной 75 °С для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости В и 115 °С для обмоток с изоляцией классов F и H (см. табл. 2.12). В табл. 2.13 приведены значения удельного электрического сопротивления меди и алюминия при различных температурах.

Коллекторные пластины изготавливают из холоднокатаной меди или меди с присадкой кадмия (кадмиевая медь), обладающей меньшим износом на истирание. Изоляционные прокладки между пластинами коллектора выполняют из миканита. Миканит в виде пластин или ленты изготавливают из щипаной слюды, наклеиваемой на подложку из стеклоткани.

Контактные кольца машин переменного тока изготавливают из стали, чугуна или меди. Для осуществления скользящего контакта с коллектором и контактными кольцами применяют электрические щетки, технические характеристики которых и рекомендации по применению приведены в табл. 2.14.

Обмоточные провода, применяемые в электрических машинах для изготовления обмоток, должны удовлетворять целому комплексу требований: 1) малая толщина изоляционного слоя провода, минимальная площадь, занимаемая изоляцией в пазах сердечников; 2) высокая механическая прочность и одновременно гибкость металлической (медной) жилы; 3) эластичность, электроизоляционная прочность и нагревостойкость изоляционного покрытия, его высокая теплопроводность (для беспрепятственного отвода теплоты от токоведущей жилы), стойкость к растворителям лаков, которыми пропитывается обмотка электрической машины.

К изоляционным материалам, применяемым в электрических машинах, работающих в условиях химического производства, на предприятиях по добыче и переработке нефти предъявляются повышенные требования к химической стойкости. Объясняется это повышенным содержанием в воз-

Таблица 2.14. Технические данные щеток электрических машин и рекомендации по их применению

Марка щетки	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Допустимая плотность тока, А/мм ²	Допустимая скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Рекомендуемая область применения
Графитные					
ГЗ	1,9	11	25	20—25	Для генераторов и двигателей с облегченными условиями коммутации и для контактных колец. Мощность до 10 кВт
611М	2,0	12	40	20—25	
6110М	2,0	15	90	12—22	
Электрографитированные					
ЭГ2А	2,6	10	45	20—25	Для генераторов и двигателей со средними и затрудненными условиями коммутации и для контактных колец. Мощность более 10 кВт при напряжении до 1000 В
ЭГ2АФ	2,2	15	90	15—21	
ЭГ4	2,0	12	40	15—20	
ЭГ8	2,4	10	40	20—40	
ЭГ14	2,5	11	40	20—40	
ЭГ51	2,2	12	60	20—25	
ЭГ61	3,0	13	60	35—50	
ЭГ71	2,2	12	40	20—25	
ЭГ74	2,7	15	50	17,5—25	
ЭГ74АФ	2,3	15	60	15—21	
ЭГ85	2,3	15	50	17,5—35	
Металлографитные					
МГ2	0,5	20	20	18—23	Для низковольтных генераторов
МГ4	1,1	15	20	20—25	
МГСО	0,2	20	20	18—23	

духе химически активных газов и паров масел.

Для изолирования медной проволоки обмоточных проводов применяют волокнистую, эмалевую или эмаль-волокнистую изоляции. Если в обмоточном проводе применена алюминиевая проволока, то в буквенное обозначение обмоточного провода добавляется буква А.

Наибольшее применение получили обмоточные провода с эмалевой изо-

ляцией — эмалированные провода. Толщина эмалевой изоляции почти в три раза меньше, чем у волокнистой и эмальволокнистой изоляции обмоточных проводов.

Класс нагревостойкости изоляции обмоточных проводов зависит от свойств пропиточного лака. В табл. 2.15 приведены марки обмоточных проводов, получившие наибольшее применение в электрических машинах, с указанием класса нагревостойкости их изоляции.

Таблица 2.15. Обмоточные провода, применяемые в электрических машинах

Марка провода	Класс нагревостойкости изоляции	Наименование провода
ПЭТ-155	F	Провод медный круглый с полиэфиримидной изоляцией
ПЭТП-155	F	Провод медный прямоугольный с полиэфиримидной изоляцией
ПЭТВ	B	Провод медный круглый с полиэфирной изоляцией
ПЭТВП	B	Провод медный прямоугольный с полиэфирной изоляцией
ПСД	F	Провод медный круглый или прямоугольный с двухслойной изоляцией из бесцелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком
ПСДК	H	То же, с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком
ПЭТВСД	B	Провод медный прямоугольный с нагревостойкой эмаливой изоляцией и двухслойной обмоткой стекловолокном, подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком

Для обмоток высоковольтных машин обычно применяют обмоточные провода марок ПСД и ПСДК с дополнительной изолировкой стеклолентой, пропитанной лаками.

2.7. Режимы работы электрических машин

Режим работы электрической машины — это установленный порядок чередования периодов, характеризующихся величиной и продолжительностью нагрузки, отключений, торможения, пуска и реверса во время ее работы.

Режимы работы электродвигателей в электроприводах различных рабочих машин разнообразны и определяются технологическими процессами, реализуемыми этими рабочими машинами. Для иллюстрации этих режимов работы используют *нагрузочные диаграммы*. Такая диаграмма представляет собой графически выраженную зависимость параметра, характеризующего нагруз-

ку приводного двигателя (мощности P , момента M или силы потребляемого тока I) от продолжительности t отдельных этапов, составляющих время работы электропривода. В действительности нагрузочная диаграмма двигателя может иметь вид графика любой формы: прямой горизонтальной линии, если нагрузка двигателя в рассматриваемый отрезок времени не изменялась, либо кривой линии с плавным переходом от одного уровня нагрузки к другому, если нагрузка изменялась. Плавность перехода уровней нагрузки обусловлена инерционностью процессов в электроприводе. Для упрощения расчета требуемой мощности двигателя криволинейный график нагрузочной диаграммы разбивают на прямолинейные участки, в пределах которых нагрузка условно остается неизменной (рис. 2.10). Чем больше участков с различной нагрузкой, тем меньше ошибка такой замены, но тем сложнее последующие расчеты.

Согласно действующему стандарту ГОСТ 183—74 существует три основ-

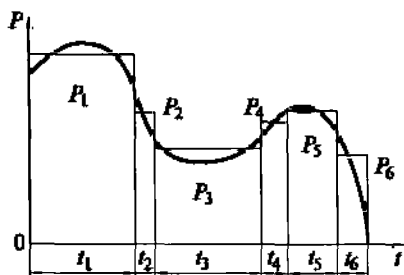
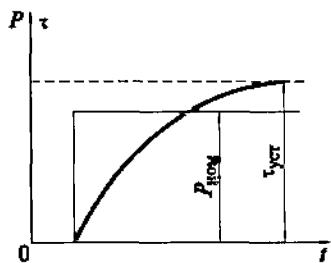


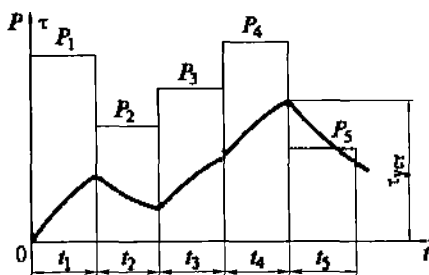
Рис. 2.10. Нагрузочная диаграмма электропривода

ных режима работы двигателей, различающиеся характером изменения нагрузки.

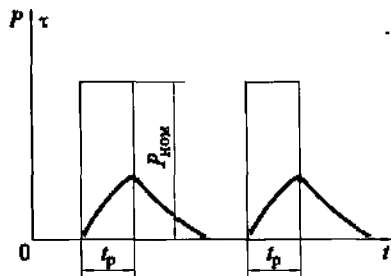
1. **Продолжительный режим S1** — когда при неизменной номинальной нагрузке $P_{ном}$ работа двигателя продолжается так долго, что температура перегрева всех его частей успевает достигнуть установившихся значений $\tau_{уст}$.



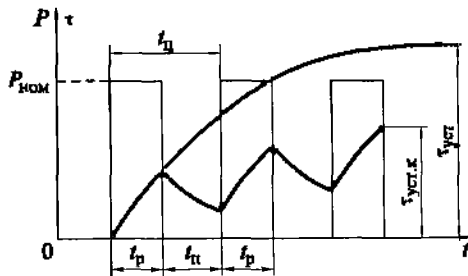
а



б



в



г

Рис. 2.11. Нагрузочные диаграммы режимов работы двигателя:

а — продолжительного с неизменной нагрузкой; б — то же, с переменной нагрузкой; в — кратковременного; г — повторно-кратковременного

тельны, что все части двигателя успевают охладиться до температуры окружающей среды (допускается превышение температуры не более чем на 1 °C).

Стандартом установлена длительность периодов нагрузки 10; 30; 60 и 90 мин. В условном обозначении кратковременного режима указывается продолжительность периода нагрузки, например S2 — 30 мин.

В кратковременном режиме работают электроприводы шлюзов, разного рода заслонок, вентилях и других запорных устройств, регулирующих подачу рабочего вещества (нефть, газ, вода и др.) посредством трубопровода к объекту потребления.

3. Повторно-кратковременный режим S3 — когда кратковременные периоды работы двигателя t_p чередуются с периодами отключения двигателя (паузами) t_n , причем за период работы t_p превышение температуры не успевает достигнуть установившихся значений, а за время паузы части двигателя не успевают охладиться до температуры окружающей среды. Общее время работы двигателя в повторно-кратковременном режиме разделяется на периодические повторяющиеся циклы продолжительностью

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_n.$$

При повторно-кратковременном режиме работы график нагревания двигателя имеет вид пилообразной кривой (рис. 2.11, з). При достижении двигателем установившегося значения температуры перегрева, соответствующего повторно-кратковременному режиму $\tau_{\text{уст.к}}$, температура перегрева двигателя продолжает колебаться от τ_{min} до τ_{max} . При этом $\tau_{\text{уст.к}}$ меньше установившейся температуры перегрева, которая наступила бы, если режим

работы двигателя был продолжительным ($\tau_{\text{уст.к}} < \tau_{\text{уст}}$). Примерами повторно-кратковременного режима являются работа электроприводов лифтов, подъемных кранов, экскаваторов и других устройств, для которых характерна цикличность (чередование периодов работы с паузами). При этом продолжительность цикла $t_{\text{ц}} = t_p + t_n$ не должна превышать 10 мин.

Повторно-кратковременный режим характеризуется *относительной продолжительностью включения, %*,

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} 100.$$

Действующим стандартом предусмотрены номинальные повторно-кратковременные режимы с ПВ 15, 25, 40 и 60 % (для продолжительного режима ПВ = 100 %). В условном обозначении повторно-кратковременного режима указывают величину ПВ, например, S3 — 40 %.

При переводе двигателя из продолжительного режима (ПВ = 100 %) в повторно-кратковременный режим мощность двигателя, по сравнению с его мощностью в продолжительном режиме, может быть увеличена: при ПВ = 60 % — на 30 %, при ПВ = 40 % — на 60 %, при ПВ = 25 % — в 2 раза, при ПВ = 15 % — в 2,6 раза.

Рассмотренные три номинальных режима считаются основными. В каталогах на двигатели, предназначенные для работы в каком-либо из этих режимов, указаны номинальные данные, соответствующие режиму работы.

Помимо рассмотренных трех основных режимов, стандартом предусмотрены еще и дополнительные режимы:

повторно-кратковременный режим S4 с частыми пусками, с числом включений в час 30, 60, 120 или 240;

повторно-кратковременный режим S5 с частыми пусками и электрическим торможением в конце каждого цикла;

перемежающийся режим S6 с частыми реверсами и электрическим торможением;

перемежающийся режим S7 с частыми пусками, реверсами и электрическим торможением;

перемежающийся режим S8 с двумя и более разными частотами вращения.

2.8. Качество и надежность электрических машин

Электрическая машина является изделием отрасли электротехнической промышленности, называемой электромашиностроением. Электрическая машина, как и другие изделия, должна быть качественной, т. е. удовлетворять конкретным показателям качества. Эти показатели ввиду их многообразия целесообразно разделить на две группы. Первая группа показателей качества связана с параметрами, определяющими *назначение* машины, и представляет собой перечень ее номинальных данных (см. 2.1). Другими словами, при работе в режимах, указанных в технических условиях на данную машину, ее фактические номинальные данные должны быть равны значениям, записанным в паспорте этой машины: номинальным значениям тока, частоты вращения, КПД и т. д. Показатели качества этой группы легко проверить при эксплуатации электрической машины путем ее номинальной нагрузки либо другим (косвенным) методом.

Вторая группа показателей качества относится к *надежности* электриче-

ской машины и может быть проверена лишь в процессе испытания машины на надежность. Поэтому прежде чем рассматривать конкретные показатели качества этой группы, ознакомимся подробнее с понятием надежности электрических машин.

Надежность — это свойство изделия (электрической машины) выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих номинальному режиму и условиям технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

К основным показателям, определяющим надежность электрической машины, относятся: исправность, работоспособность, отказ.

Исправность — состояние, при котором электрическая машина соответствует всем требованиям, установленным для нее технической документацией, например техническими условиями.

Работоспособность — способность электрической машины выполнять требуемые функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных технической документацией. Разница в рассмотренных понятиях состоит в том, что работоспособная машина в отличие от исправной может не соответствовать некоторым требованиям технической документации, не влияющим на выполнение машиной заданных функций. Например, машина может иметь некачественную окраску либо другой дефект, не влияющий на основные параметры машины — мощность, КПД, частоту вращения и т. п. Строго говоря, такая машина неисправна, но в течение определенного времени остается работоспособной.

Отказ — нарушение работоспособности машины. Различают отказы внезапные и постепенные. Отказ называют *внезапным*, если он характеризуется скачкообразным изменением одного или нескольких заданных параметров. Если же отказу предшествует постепенное изменение какого-либо параметра, то его называют *постепенным*. Например, постепенный износ коллектора может послужить причиной нарушения коммутации в машине постоянного тока (постепенный отказ), разрушение подшипника или дефектной щетки могут послужить причинами внезапного отказа машины.

Электрическая машина должна обладать *долговечностью* — свойством сохранять работоспособность до наступления *предельного состояния*, оговоренного технической документацией. Предельное состояние — это состояние машины, при котором ее дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого отклонения заданных параметров сверх установленных пределов, после чего машина должна быть отправлена в ремонт или изъята из эксплуатации и заменена исправной машиной с требуемыми параметрами.

Долговечность электрической машины определяется техническим ресурсом и сроком службы. *Технический ресурс* — это наработка машины от начала эксплуатации или от возобновления эксплуатации после ремонта до наступления предельного состояния, а *срок службы* — это календарная продолжительность эксплуатации машины от ее начала или от возобновления после ремонта до наступления предельного состояния.

Вошедшее в определение технического ресурса понятие «наработка»

представляет собой продолжительность работы машины в единицах времени или в единицах выполненной работы — километрах, тоннах и т. п., в зависимости от вида работы, выполняемой рабочей машиной, в приводе которой установлен электрический двигатель. Если электрическая машина работает непрерывно, то ее технический ресурс, измеренный в единицах времени, равен сроку службы. Если же машина работает с перерывами, то технический ресурс определяется суммарной наработкой. В этом случае технический ресурс машины, измеренный в единицах времени, меньше срока службы.

В зависимости от отрезка времени, на протяжении которого определяют наработку, различают суточную, месячную наработку и т. п.

Свойство электрической машины сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки называют *безотказностью*.

Одним из количественных показателей безотказности является *вероятность безотказной работы* — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. Количественно вероятность безотказной работы определяется статистическим отношением числа машин, безотказно проработавших в течение времени t , к общему числу работоспособных машин N в начале наблюдения, т. е. при $t = 0$

$$P(t) = \frac{N - n(t)}{N},$$

где $n(t)$ — количество машин, отказавших за время t .

Вероятность безотказной работы является убывающей функцией времени и может изменяться от нуля (при

$t = \infty$) до единицы (при $t = 0$). Из этого следует, что с увеличением времени заданной наработки t вероятность безотказной работы $P(t)$ уменьшается, и наоборот — с уменьшением наработки t величина $P(t)$ возрастает. Вероятность безотказной работы электрической машины определяется при наработке; она должна быть не менее указанной в технической документации. Например, для асинхронных двигателей общего назначения современных серий основного исполнения установлена вероятность безотказной работы $P(t) > 0,9$ при наработке $t = 10\,000$ ч, а для двигателей постоянного тока $P(t) > 0,9$ при наработке $t = 2000$ ч.

Опыт эксплуатации электрических машин установлено три периода, характеризующихся различной интенсивностью отказов λ . На графике интенсивности отказов (рис. 2.12) эти периоды отмечены характерным изломом графика $\lambda = f(t)$. В течение первого периода, называемого *периодом приработки*, выявляются скрытые дефекты: либо это дефекты технологического характера, не обнаруженные службой технического контроля завода-изготовителя, либо дефекты, возникшие при транспортировке машины или ее хранения на складе. Этот период характерен случайными отказами. С течением времени эксплуата-

ции машины интенсивность отказов снижается и при достижении момента времени t_1 она достигает некоторого постоянного значения $\lambda_{\text{пост}}$.

С этого времени наступает *нормальная эксплуатация*. Отказы в этот период носят случайный характер и происходят в основном по причине нарушения условий эксплуатации: перегрузка машины, изменение внешних факторов (допустимых значений температуры, влажности, вибраций и т.п.), попадание внутрь машины металлической стружки или воды и т.д. Период нормальной эксплуатации является наиболее продолжительным (15—25 тыс. ч) и продолжается до момента времени t_2 .

Затем наступает *период износа* (старения). Этому периоду (от t_2 до t_3) соответствует нарастание интенсивности отказов, обусловленных главным образом старением изоляции, износом подшипников, коллектора, контактных колец и т.п.

Важным свойством электрической машины является ее *ремонтпригодность*, состоящая в приспособленности к восстановлению работоспособности путем проведения ремонта либо замены отказавшего элемента, например подшипника.

Многолетние наблюдения за эксплуатацией электрических машин и

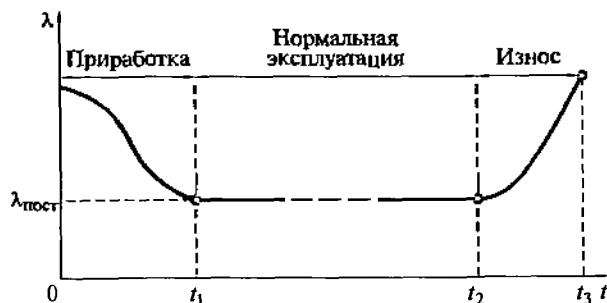


Рис. 2.12. Интенсивность отказов для трех периодов работы электрической машины

анализ причин их отказов показали, что в асинхронных двигателях 85—95 % всех отказов происходит вследствие выхода из строя обмотки статора, при этом от 90 до 93 % этих отказов вызваны межвитковыми короткими замыканиями, от 5 до 8 % — выходом из строя подшипниковых узлов, остальное приходится на прочие причины (в основном механические повреждения). В машинах постоянного тока около 65 % всех отказов происходит из-за выхода из строя обмотки якоря, 15 % — обмотки возбуждения, 9 % — коллектора, 11 % — подшипников и из-за других механических повреждений.

Преобладание отказов по причине выхода из строя обмоток статора и якоря в машинах малой и средней мощности объясняется в основном спецификой укладки *всыпных* обмоток, когда проводники располагаются в пазу беспорядочно, образуя неровности и перехлесты. В процессе укладки проводников в пазы их приходится уплотнять, что является причиной возможных механических повреждений изоляции обмоточных проводов и приводит к межвитковым коротким замыканиям. Более надежными являются обмотки из проводов прямоугольного сечения, так как они укладываются в открытые и полуоткрытые пазы в определенном порядке.

Существенное влияние на надежность электрических машин оказывают *вибрации*, вызванные неуравновешенностью (отсутствием балансировки) вращающихся частей машин. Эти вибрации передаются на подшипники, ускоряя их износ, и на обмотки, изоляция которых, особенно в лобовых частях, испытывая механические усилия, изнашивается и преждевременно выходит из строя.

Причиной частых отказов электрических машин является также их применение в условиях, не соответствующих исполнению этих машин по способам защиты и монтажа, а также климатическим условиям эксплуатации. Поэтому значительный резерв повышения надежности электрических машин заложен в разработке и внедрении различных специализированных исполнений электрических машин, рассчитанных на специфические условия работы.

Для предупреждения отказов машин, вызванных их перегрузкой, в наиболее ответственных случаях применяют встроенную температурную защиту обмотки статора, отключающую машину от сети при недопустимом перегреве обмотки.

Надежность электрической машины закладывается еще на стадии ее проектирования. Большое влияние на надежность оказывает качество изготовления машины, в том числе качество комплектующих ее деталей. На надежность оказывают влияние условия транспортировки и хранения машины, ее монтаж и соблюдение правил эксплуатации.

По многим параметрам надежности электрических машин установлены количественные показатели и допуски на них. Однако их определение возможно лишь путем проведения специальных испытаний, например ускоренных испытаний электрических машин на надежность.

2.9. Вибрации в электрических машинах

Наиболее существенной причиной возникновения вибраций в электрических машинах является неуравнове-

шенность вращающихся частей электрических машин. Иногда эти вибрации усиливаются вибрациями смежных механизмов или же погрешностью, допущенной при центровке сопрягаемых валов. Вибрация может быть вызвана работой подшипников при

где n — частота вращения вала машины, об/мин.

Виброскорость определяет класс вибрации. Ниже приведены максимально допустимые значения виброскорости $v_{\max}$ для различных классов вибраций:

Классы вибрации	0,28	0,45	0,71	1,12	1,8	2,8	4,5	7,1
$v_{\max}$, мм/с	0,28	0,45	0,71	1,12	1,8	2,8	4,5	7,1

чрезмерной вязкости масла в подшипнике в условиях низкой температуры.

Измерение вибрации производят, как правило, при работе машины в режиме холостого хода при номинальных значениях питающего напряжения и частоты вращения. Вибрацию определяют методом измерения вибрационного перемещения (виброперемещения). В простейшем случае такое виброперемещение A можно определить стрелочным индикатором. По измеренному виброперемещению какой-либо части электрической машины (обычно это щитовые или стояковые подшипники) вычисляют величину вибрационной скорости (виброскорости), мм/с,

$$v \approx 0,074 \cdot 10^{-3} An,$$

Для электрических машин с частотой вращения менее 600 об/мин допустимое значение вибраций не устанавливается, но при этом требуется, чтобы виброперемещение не превышало 0,05 мм. При частоте вращения 600 об/мин и более устанавливаются предельно допустимые вибрации, которые определяют класс вибрации. В зависимости от требований по вибрации электрические машины разделяют на категории: N — нормальная; R — требующая пониженных вибраций; S — особо жесткие требования по вибрации.

В табл. 2.16 указаны категории электрических машин N , R и S по допустимым классам вибрации, при разных частотах вращения в зависимости от габарита машины (высоты оси вращения h).

Таблица 2.16. Категории электрических машин по допустимым классам вибрации

Категория машин	Частота вращения, об/мин	Допустимый класс вибрации для машин с высотой оси вращения, мм			
		от 56 до 71 включительно	от 80 до 132 включительно	св. 132 до 225 включительно	св. 225 до 400 включительно
N	От 600 до 6000 включительно	1,12	1,8	2,8	4,5
R	До 1800 включительно	0,71	0,71	1,12	1,8
	Свыше 1800 до 6000 включительно	0,71	1,12	1,8	2,8
S	До 1800 включительно	0,45	0,45	0,71	1,12
	Свыше 1800 до 6000 включительно	0,45	0,71	1,12	1,8

2.10. Шумы в электрических машинах

При работе электрической машины возникают шумы. Причины возникновения этих шумов разделяют на механические, вентиляционные и магнитные.

Основной причиной шумов *механического* происхождения является неудовлетворительная балансировка вращающихся частей машины (ротора) и сочлененных с ее валом элементов, например механической муфты. Шумы часто создают подшипники (шумы роликподшипников больше, чем шарикоподшипников), а в машинах постоянного тока шум может создаваться щеточно-коллекторным узлом.

Исходя из изложенного, средствами понижения шумов механического происхождения являются: тщательная (статическая и динамическая) балансировка ротора (якоря); применение в машине подшипников более высокого качества; тщательное притирание щеток к коллектору; надежное закрепление щеткодержателей.

Причинами шумов *вентиляционно-*го происхождения могут быть: недостаточная жесткость вентилятора и, как следствие, его вибрация при работе машины; возникновение в путях прохождения охлаждающего воздуха вихрей, создающих шумы. Часто причиной вентиляционного шума является резонирование неудачно спроектированных тонкостенных элементов на пути вентиляционного потока (кожуха вентилятора, направляющих щитков, жалюзи и т. д.). Неудачный выбор соотношения числа лопаток вентилятора и числа входных и выходных отверстий также может быть причиной шума в машине.

Средствами снижения шумов являются: применение вентилятора более жесткой конструкции, исключающей его вибрацию, и тщательная его балансировка; создание в машине аэродинамического напора, исключающего появление завихрений воздушного потока.

Магнитные шумы появляются в машине под влиянием переменных электромагнитных сил, возникающих из-за периодического перемагничивания элементов магнитопровода машины. Это может быть вызвано прохождением переменного тока по обмоткам машины либо вращением сердечника якоря в постоянном магнитном поле возбуждения. Другой причиной магнитных шумов является изменение магнитной проводимости воздушного зазора из-за зубчатой поверхности сердечников ротора и статора: при прохождении над зубцами ротора зубцов и пазов статора магнитный поток воздушного зазора и зубцового слоя пульсирует. Уменьшение шумов магнитного происхождения достигается рациональным выбором числа пазов в сердечниках статора и ротора, скосом пазов на роторе (якоре), применением полузакрытых пазов (см. рис. 3.6, а). Шумы в электрических машинах измеряют прибором — *шумомером*, который показывает уровень интенсивности шума в децибелах (дБ). Более совершенным является прибор, называемый частотным спектрометром.

В зависимости от требования к уровню шума электрические машины разделяют на четыре класса:

первый класс — к машинам не предъявляются требования по уровню шума;

второй класс — машины с малошумными подшипниками качения и

специальной малошумной конструкцией вентиляционной системы;

третий класс — машины с пониженной эффективностью вентиляции или с отсутствием таковой, а следовательно, машины с пониженным использованием активных материалов (повышенных габаритов), с применением подшипников скольжения (практически не создающих шума);

четвертый класс — машины со специальными устройствами снижения шума, например, с использованием звукоизолирующего кожуха.

В готовой машине для снижения шума возможно применение звукопоглощающих покрытий, установка звукоизолирующего кожуха или пристраивание к машине специально разработанного глушителя. Такой глушитель должен иметь спиральную форму и являться продолжением выходного канала воздушного потока. Для увеличения поверхности поглощения шума внутри глушителя должны быть перегородки, направленные перпендикулярно воздушному потоку.

2.11. Серии электрических машин

Электрические машины изготавливают, как правило, сериями. Серия электрических машин представляет собой ряд подобных машин с возрастающей по заданной шкале мощностью, имеющих однотипную конструкцию и удовлетворяющих единому комплексу требований.

Каждая электрическая машина, входящая в серию, представляет собой типоразмер с определенными параметрами (мощность, частота вращения, масса и т. п.) и установочно-присоединительными размерами.

Для того чтобы серия электрических машин была экономически выгодной, принимают такие размеры статоров и роторов (якорей), которые позволяют довести до минимума количество требуемых штампов при минимальных отходах электротехнической стали. Это достигается, в частности, тем, что одни и те же штампованные листы используют для изготовления сердечников машин соседних по шкале мощностей путем изменения длины этих сердечников. Другие мероприятия по унификации типоразмеров серии позволяют сократить номенклатуру пресс-форм, моделей для отливок и другой технологической оснастки.

По мере развития науки и технологии, создания новых материалов с улучшенными свойствами, накопления опыта проектирования и эксплуатации электрических машин оказывается возможным создавать более совершенные серии электрических машин как по техническим, так и экономическим показателям. Поэтому периодически взамен существующим создаются новые, более совершенные серии.

Некоторые крупные серии электрических машин помимо машин основного исполнения содержат ряд модификаций. Например, это относится к некоторым сериям асинхронных двигателей (табл. 2.17).

Рыночная система экономики требует создания конкурентно-способной продукции не только на внутреннем, но и на внешнем рынках. Для решения этой задачи необходимо создавать продукцию высокого качества с учетом международных требований и стандартов.

Применительно к электрическим машинам эти требования касаются главным образом увязки ряда номи-

Таблица 2.17. Примеры модификаций серий электрических машин

Тип модификации	Назначение
С повышенным пусковым моментом	Для привода механизмов с большой нагрузкой в момент пуска (компрессоры, дробилки, глиномылки и др.)
С повышенным скольжением	Для привода механизмов с большими моментами инерции, с нагрузкой пульсирующего характера, с большой частотой пусков и реверсов
С повышенными энергетическими показателями (η , $\cos\varphi$)	Для привода механизмов с круглосуточной работой, при которой особое значение имеет повышение КПД
С фазным ротором	Применяется в случае, когда мощность питающей сети недостаточна для пуска электродвигателей с короткозамкнутым ротором, а также для приводов с плавным регулированием частоты вращения вниз от синхронной
Малошумные	Для привода с повышенными требованиями по уровню шума
Многоскоростные (с двумя обмотками или с переключением обмотки на два разных числа полюсов)	Для привода механизмов со ступенчатым регулированием частоты вращения (станки, лебедки и т.д.)
Встраиваемые	Для встраивания в станки и механизмы

нальных мощностей электрических машин с их габаритными, установочными и присоединительными размерами.

Эти международные требования пока не являются едиными и регламентируются документами различных организаций:

решениями Международной электротехнической комиссии МЭК (создана в 1906 г.);

стандартами США NEMA (Американское общество инженеров);

документами CELENEC (Организация по стандартизации электротехнических изделий стран Западной Европы).

В настоящее время с целью адаптации производимых в России электрических машин к международному рынку, при разработке новых и модерни-

зации существующих серий электрических машин, предназначенных для экспорта, принято руководствоваться главным образом рекомендациями CELENEC, в которых более чем в других документах указанные требования обобщены.

Некоторые из выпускаемых в настоящее время серий электрических машин имеют две версии: одну для внутреннего рынка, выполненную по стандартам России, а другую для экспорта, выполненную по нормам CELENEC. Такое разделение обеспечивает отечественному электромашиностроению конкурентоспособность на международном рынке.

Требования к электрическим машинам в части их технических данных, способов защиты и охлаждения, условий эксплуатации и т.п. настолько

разнообразны, что наряду с сериями общего назначения создано большое число серий электрических машин специального назначения. При этом следует иметь в виду, чем в большей степени свойства электрической машины соответствуют предъявляемым требованиям, тем надежнее и долговечнее эта машина в эксплуатации. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе двигателей для электропривода, предъявляющего комплекс специфических требований.

В настоящее время номенклатура серий электрических машин настолько многочисленна, что дать информацию о всех сериях в одном справоч-

нике не представляется возможным. Периодически одни серии снимаются с производства, а взамен создаются новые, более совершенные. В данном справочнике рассмотрены лишь серии электрических машин, получившие наибольшее применение в настоящее время. Полную информацию о всех производимых в России сериях электрических машин или других электротехнических изделий можно получить в организации «Институт промышленного развития» Информэлектро по адресу: Россия, 105037, Москва, Е-137. Сайт в Интернете: www.prominfo.ru. Адрес электронной почты: prospect@prominfo.ru.

РАЗДЕЛ II

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ГЛАВА 3

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.1. Принцип действия асинхронного двигателя

В расточке неподвижной части асинхронного двигателя — статора расположена вращающаяся часть двигателя — ротор, состоящий из вала, сердечника и обмотки (рис. 3.1). Обмотка ротора представляет собой короткозамкнутую конструкцию, состоящую из нескольких (на рис. 3.1 из восьми) алюминиевых стержней, расположенных в продольных пазах сердечника ротора и замкнутых с двух сторон по

торцам ротора алюминиевыми кольцами (на рисунке эти кольца не показаны). Ротор и статор разделены воздушным зазором.

При включении трехфазной обмотки статора в сеть в обмотках фаз, соединенных «звездой» или «треугольником», появляются токи, сдвинутые по фазе (во времени) относительно друг друга на 120 эл. град (рис. 3.2, а):

$$i_A = I_{A\max} \sin \omega t;$$

$$i_B = I_{B\max} \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$i_C = I_{C\max} \sin(\omega t - 240^\circ).$$

Ток каждой фазной обмотки создает пульсирующую МДС, а совокупное действие всех трех МДС результирующую МДС, вектор которой, принимая различное направление в разные моменты времени, вращается относительно статора. Принцип образования этой вращающейся МДС рассмотрим на простейшей трехфазной двухполюсной обмотке статора, каждая фаза которой состоит из одной катушки. Проведем ряд построений вектора МДС трехфазной обмотки, соответствующих различным моментам времени, отмеченным на графике рис. 3.2, а цифрами 0, 1, 2, 3. В момент времени 0

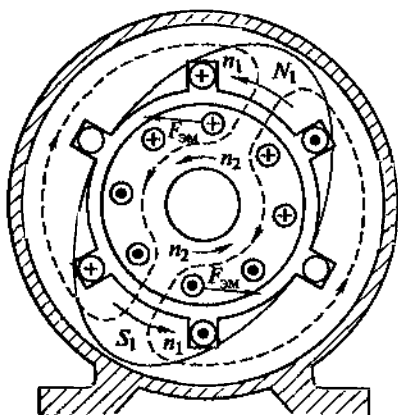


Рис. 3.1. К принципу действия асинхронного двигателя

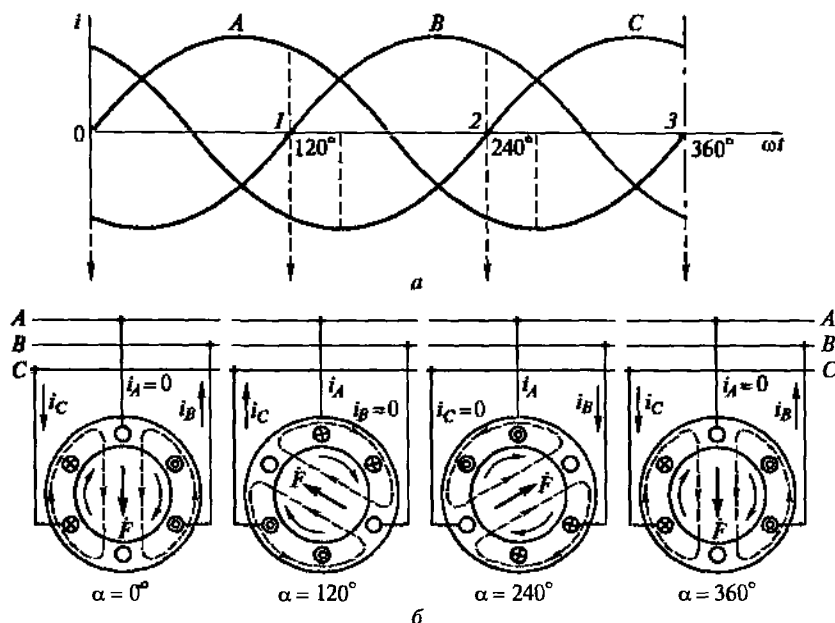


Рис. 3.2. Принцип получения вращающейся МДС

ток в фазе A равен нулю, в фазе B имеет отрицательное направление, а в фазе C — положительное. Эти направления тока отмечаем на рис. 3.2, б. Затем в соответствии с указанными в пазовых сторонах обмотки направлениями токов определяем направление вектора МДС $\vec{F}$ трехфазной обмотки статора (вектор направлен вертикально вниз). В момент времени I ток в обмотке фазы B равен нулю, в обмотке фазы A имеет положительное направление, а в обмотке фазы C — отрицательное направление. Сделав построения, аналогичные предыдущему моменту времени 0 , видим, что вектор МДС $\vec{F}$ повернулся относительно своего положения в момент времени 0 на 120° по часовой стрелке. Проведя такие же построения для моментов вре-

мени 2 и 3 , видим, что вектор $\vec{F}$ каждый раз поворачивается на 120° и за один период трехфазного переменного тока делает полный оборот (360°).

Если частота тока в обмотке статора $f_1 = 50$ Гц, то вектор МДС $\vec{F}$ вращается с частотой 3000 об/мин. В общем случае частота вращения вектора МДС n_1 , называемая синхронной частотой вращения, прямо пропорциональна частоте тока f_1 и обратно пропорциональна числу пар полюсов p обмотки статора:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}.$$

Значения синхронных частот вращения для промышленной частоты переменного тока $f_1 = 50$ Гц зависят от числа пар полюсов:

Число пар полюсов p	1	2	3	4	5	6
Синхронная частота вращения n_1 , об/мин ..	3000	1500	1000	750	600	500

Вращающаяся МДС создает в точке статора вращающееся магнитное поле. При необходимости изменить направление вращения МДС нужно поменять порядок следования токов в фазных обмотках. Так, в рассмотренном примере (см. рис. 3.2) порядок следования токов в фазных обмотках был $A-B-C$. При этом МДС вращалась по часовой стрелке. Если порядок следования токов в фазных обмотках изменить ($A-C-B$), то МДС трехфазной обмотки будет вращаться против часовой стрелки. Для изменения порядка следования токов в обмотках фаз необходимо поменять места присоединения к сети двух проводов, отходящих от зажимов обмотки статора. Изменение направления тока во всех трех обмотках фаз не меняет направления вращения поля статора.

Таким образом, при включении обмотки статора асинхронного двигателя в сеть трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле статора, частота вращения которого n_1 (см. рис. 3.1). Вращающееся поле статора (полюсы N_1 и S_1) сцепляется как с обмоткой статора, так и с обмоткой ротора и наводит в них ЭДС. При этом ЭДС обмотки статора, являясь ЭДС самоиндукции, действует встречно приложенному к обмотке напряжению и ограничивает величину тока в обмотке. Обмотка ротора замкнута, поэтому ЭДС ротора создает в стержнях этой обмотки токи. Взаимодействие токов ротора с полем статора создает на роторе электромагнитные силы $F_{эм}$, направление которых определяют по правилу «левой руки». Из рис. 3.1 видно, что силы $F_{эм}$ стремятся повернуть ротор в направление вращения магнитного поля статора. Совокупность сил $F_{эм}$ создает на роторе электромагнитный момент M , приводящий его

во вращение с частотой n_2 . Вращение ротора посредством вала передается рабочему механизму. Характерным признаком асинхронных машин является неравенство частот вращения ротора n_2 (асинхронная частота вращения) и вращающегося поля статора n_1 (синхронная частота вращения), так как только в этом случае в стержнях обмотки ротора асинхронного двигателя индуцируется ЭДС.

В двигательном режиме работы асинхронной машины $n_2 < n_1$. Отставание ротора характеризуется величиной, называемой *скольжением*, %,

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100.$$

Таким образом, электрическая энергия, поступающая из сети в обмотку статора, преобразуется в механическую энергию вращения ротора двигателя.

3.2. Активная часть асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Асинхронные машины относятся к категории *неявнополюсных* электрических машин, поскольку ни на статоре, ни на роторе асинхронной машины нет явно выраженных полюсов, при этом обмотки статора и ротора равномерно распределены в пазах по внутреннему периметру сердечника статора и внешнему периметру сердечника ротора.

Сердечники статора и ротора делают шихтованными из штампованных листов (пластин) холоднокатаной листовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм (рис. 3.3). Для ослабления вихревых токов листы статора перед сборкой в пакет лакируют, а листы ротора оксидируют. Полученная ок-



Рис. 3.3. Магнитная система четырехполюсной ($2p = 4$) асинхронной машины

сидная пленка является достаточной изоляцией, так как частота перемагничивания ротора невелика и в номинальном режиме обычно не превышает 5 Гц.

На внутренней поверхности сердечника статора и наружной поверхности сердечника ротора расположены продольные пазы, в которых располагаются пазовые стороны обмоток статора и ротора соответственно. Сердечники статора и ротора, разделенные воздушным зазором, образуют магнитную систему асинхронной ма-

шины, в которой замыкается основной магнитный поток (см. рис. 3.3).

На рис. 3.4, *а* показан статор асинхронной машины, состоящий из корпуса 1, сердечника 2 и обмотки 3. В пазах сердечника статора расположены пазовые стороны обмотки статора, на переднем плане рисунка видны лобовые части обмотки статора, которые соединяют пазовые стороны этой обмотки, образуя обмотку статора определенной конструкции, состоящую обычно из $m_1 = 3$ однофазных обмоток, соединенных «звездой» или «треугольником».

Элементом обмотки статора является катушка, состоящая из пазовых сторон и лобовых частей. Пазовые стороны катушки расположены в пазах сердечника. Если пазовая сторона катушки занимает лишь половину высоты паза, то обмотка статора получается двухслойной (рис. 3.4, *б*). При этом каждая катушка в одном пазе занимает его нижний слой, а в другом пазе — верхний слой. Если же пазовая сторона катушки занимает весь паз (рис. 3.4, *в*), то обмотка статора получается однослойной.

Шаг обмотки статора y_1 является полным (диаметральным), если он равен полюсному делению

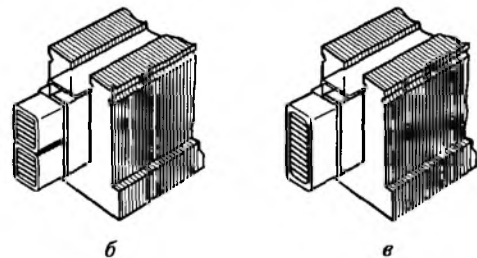
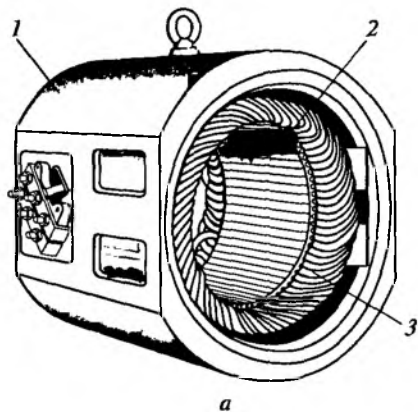


Рис. 3.4. Статор асинхронной машины (*а*) и расположение пазовых сторон обмотки статора в пазах двухслойной (*б*) и однослойной (*в*) обмоток

$$y_1 = \tau = \frac{Z_1}{2p},$$

где Z_1 — число пазов в сердечнике статора.

Шаг обмотки статора называют укороченным, если он меньше полюсного деления $y_1 < \tau$. Укорочение шага обмотки способствует улучшению формы графика распределения магнитной индукции в воздушном зазоре машины, приближая его к синусоиде. Это позволяет снизить добавочные потери и уменьшить провалы в механической характеристике асинхронного двигателя. Катушки одной фазы обмотки, расположенные в соседних пазах и соединенные последовательно, образуют *катушечную группу*. Катушечные группы, входящие в обмотку фазы, могут быть соединены между собой последовательно, параллельно или последовательно-параллельно. Три фазные обмотки, соединенные в «звезду» или «треугольник», образуют трехфазную обмотку статора.

Катушечные группы обмотки, соединенные между собой, образуют *параллельные ветви*. Число параллельных ветвей a_1 в обмотке одной фазы зависит от способа соединения катушечных групп: при последовательном соединении число параллельных ветвей минимально ($a_1 = 1$), при параллельном соединении их число равно числу полюсов $a_1 = 2p$, при смешанном соединении (последовательно-параллельном) можно получить $1 < a_1 < 2p$.

Однослойные обмотки статора не допускают укорочения шага катушки ($y_1 = \tau$), поэтому двигатели с такими обмотками имеют ухудшенные рабочие и пусковые показатели. Кроме того, они имеют большой вылет лобовых частей и повышенный расход обмоточной меди (рис. 3.5, а). Однако

эти обмотки наиболее пригодны для механизированной укладки, что способствует снижению трудоемкости изготовления двигателей. По этой причине однослойные обмотки статора получили применение в асинхронных двигателях с высотами оси вращения не более 160 мм, имеющих наибольший объем производства.

В асинхронных двигателях с высотами оси вращения $h \geq 180$ мм применяют двухслойные обмотки с укороченным шагом $y_1 < \tau$ (рис. 3.5, б). Укорочение шага обмотки позволяет устранить ЭДС высших гармоник, приблизив график распределения магнитной индукции в воздушном зазоре к синусоиде и улучшив технико-экономические показатели машины. Однако двухслойные обмотки не допускают механизированной укладки, да к тому же такие обмотки сложны в ремонте.

Обмотки статора разделяют на *всыпные* (с мягкими катушками) и обмотки с жесткими катушками (полукатушками). Всыпную обмотку изготавливают из обмоточного провода круглого сечения и размещают в полужакрытых пазах трапецеидальной формы. Перед укладкой катушкам придают требуемую форму путем наматывания их на шаблон. Затем катушки укладывают в заранее изолированные пазы (рис. 3.6, а). После укладки катушек и закрепления их в пазах посредством клиньев или крышек производят формовку лобовых частей и их бандажирование. Затем обмотанный статор пропитывают изоляционными лаками. Во время пропитки лак проникает в мелкие поры изоляционных материалов, а также заполняет промежутки между слоями изоляции. После сушки при повышенных температурах обмотка приобретает монолитность, улучшаются ее теплопровод-

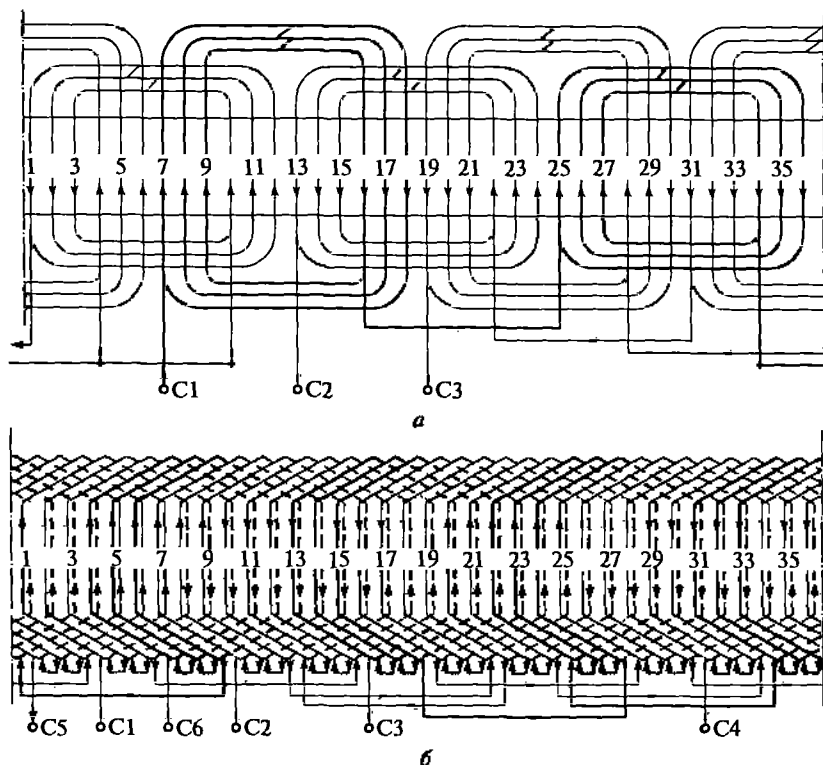


Рис. 3.5. Развернутые схемы трехфазных обмоток статора:

a — однослойная концентрическая обмотка с диаметральным шагом и расположением лобовых частей в трех плоскостях ($Z_1 = 36$; $2p = 4$; $y_{1cp} = 9$ пазов); *б* — двухслойная обмотка с укороченным шагом ($Z_1 = 36$; $2p = 4$; $y_1 = 7$ пазов)

ность, влагостойкость и механическая прочность. В итоге обмотка приобретает свойства, необходимые для придания электрической машине требуемой надежности.

Обмотки из жестких катушек или полукатушек выполняют проводом прямоугольного сечения. При этом еще до укладки катушек (полукатушек) в пазы сердечника статора им придают требуемую форму и наносят изоляцию. Затем их укладывают в полуоткрытые или открытые пазы (рис. 3.6, б, в). В высоковольтных машинах (более 1000 В) обмотку статора укладывают исключительно в открытые пазы (рис. 3.6, в), так как только в этом

случае оказывается возможной надежная электрическая изоляция обмотки статора. Перед укладкой пазовых сторон катушек в пазы дно и стенки этих пазов тщательно изолируют (электротекстом, лакотканью, а в высоковольтных машинах — миканитом). Проводники в пазах закрепляют клиньями.

Сравнение рассмотренных видов обмоток статора позволяет сделать следующие выводы: всыпные обмотки с мягкими катушками являются наиболее технологичными, так как намотка катушечных групп, а иногда и фазной обмотки целиком может выполняться без разрыва провода, что дает возмож-

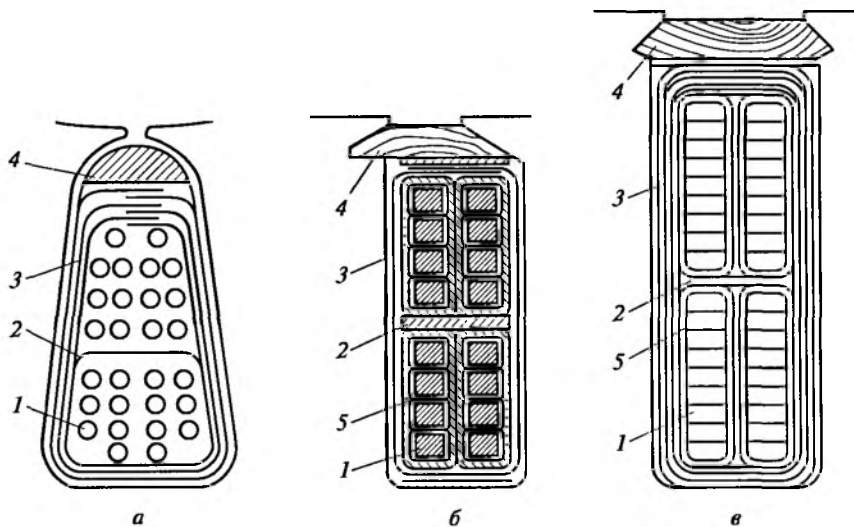


Рис. 3.6. Пазы статора:

a — полузакрытый; *б* — полукоткрытый; *в* — открытый; 1 — проводники; 2 — изоляция слоя; 3 — межслойная изоляция; 4 — изоляция стенок паза; 5 — клин

ность получить обмотку с минимальным количеством паяк. Трапецеидальные полузакрытые пазы, в которые укладывают сыпную обмотку (см. рис. 3.6, *a*), обеспечивают наиболее благоприятное использование зубцовой зоны статора, а небольшое раскрытие пазов позволяет значительно ослабить пульсации магнитного потока в воздушном зазоре. Достоинствами жестких обмоток являются лучшее заполнение пазов. Но большое раскрытие полукоткрытых и открытых пазов вызывает значительную пульсацию магнитной индукции в воздушном зазоре машины. Кроме того, возрастает коэффициент зазора $k_g > 1$, что ведет к повышению расчетного значения зазора δ' , а следовательно, к росту потерь в машине:

$$\delta' = k_g \delta,$$

где δ — фактический воздушный зазор между статором и ротором.

Роторы асинхронных машин могут быть короткозамкнутыми и фазными, различающиеся типом обмотки.

У большинства трехфазных асинхронных двигателей начала фазных обмоток статора C_1 , C_2 и C_3 и концы этих обмоток C_4 , C_5 и C_6 выводят на клеммы коробки выводов, что позво-

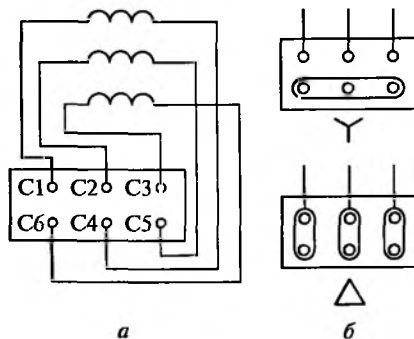


Рис. 3.7. Расположение выводов обмотки статора на клеммной панели (*a*) и способы соединения обмотки статора «звездой» и «треугольником» (*б*)

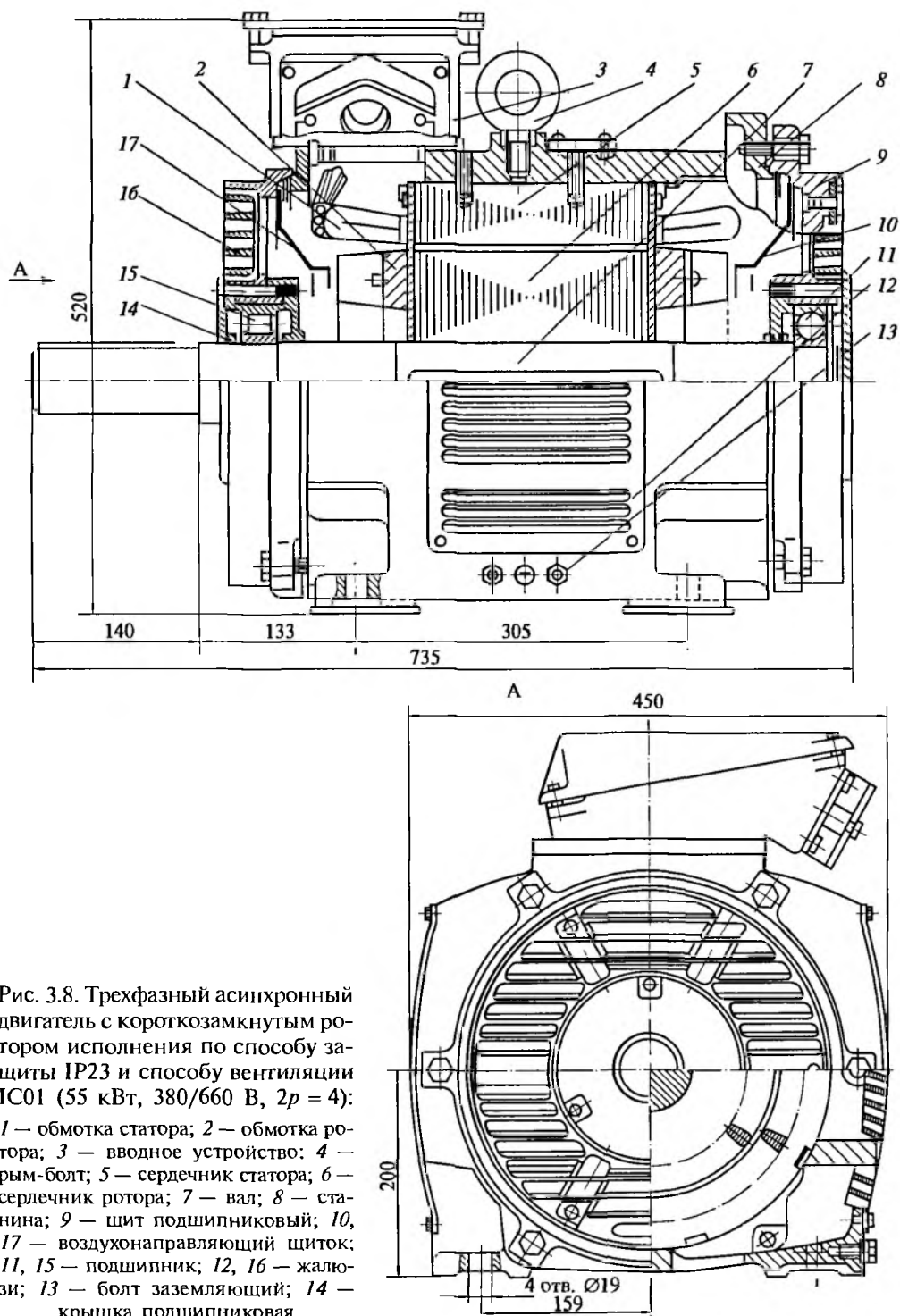


Рис. 3.8. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором исполнения по способу защиты IP23 и способу вентиляции IC01 (55 кВт, 380/660 В, $2p = 4$):

1 — обмотка статора; 2 — обмотка ротора; 3 — вводное устройство; 4 — рым-болт; 5 — сердечник статора; 6 — сердечник ротора; 7 — вал; 8 — станина; 9 — щит подшипниковый; 10, 17 — воздухонаправляющий щиток; 11, 15 — подшипник; 12, 16 — жалюзи; 13 — болт заземляющий; 14 — крышка подшипниковая

ляет соединять фазные обмотки статора в «звезду» или «треугольник» непосредственно в месте эксплуатации двигателя.

Это дает возможность использовать один и тот же двигатель для включения в сеть на два разных напряжения: 220/380 или 380/660 В. Соединение обмотки статора «звездой» или «треугольником» выполняется перестановкой перемычек на панели коробки выводов (рис. 3.7).

Короткозамкнутую обмотку ротора выполняют из алюминия путем заливки сердечника ротора под давлением. При этом размеры и форма стержней ротора определяются размерами и формой пазов сердечника ротора. Одновременно со стержнями отливают коротко замыкающие кольца и вентиляционные лопасти. Пазы ротора обычно имеют овальную форму, и лишь в двигателях с улучшенными пусковыми свойствами применяют пазы другой формы (см. 4.5). На рис. 3.8 показано устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, выполненным из алюминия методом литья под давлением.

3.3. Конструкция трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Помимо активных частей асинхронный двигатель имеет конструктивные части, которые непосредственно в электромагнитных процессах, протекающих в двигателе, не участвуют, но без них работа двигателя была бы невозможной. К таким частям относится станина (корпус) 8 (рис. 3.8).

Станина представляет собой остов двигателя, в котором расположен сердечник статора с обмоткой. Станина

воспринимает механическую нагрузку от сердечника статора, ротора с обмоткой (через подшипники и подшипниковые щиты 9). Конструкция станины в значительной степени зависит от исполнения двигателя по степени защиты и от способа охлаждения. Например, в закрытых двигателях исполнения IP44 при способе охлаждения методом наружного обдува IC0141 или при естественном охлаждении IC0041 наружная поверхность станины имеет продольные ребра для увеличения площади охлаждения. В двигателях защищенного исполнения IP23 со способом охлаждения IC01 наружная поверхность станины гладкая, но она имеет отверстия (жалюзи) для забора воздуха или выброса его наружу.

У двигателей с высотой оси вращения до 160 мм станины изготавливают из алюминиевого сплава или чугуна, в двигателях с высотой оси вращения 180 мм и более — из чугуна или стали. Применение более прочных металлов для изготовления станин обусловлено необходимостью придания станине достаточной жесткости, так как в противном случае станина под действием нагрузок может прогибаться. При этом нарушается равномерность воздушного зазора между статором и ротором. В результате ухудшаются свойства двигателя, вращение ротора становится неравномерным или даже происходит задевание ротора о статор.

Деформация станины происходит под действием силы тяжести сердечника статора с обмоткой и окружающих усилий, вызванных вращающим моментом, а также силами одностороннего магнитного тяжения. Допускается максимальный прогиб станины не более чем на 5 % от размера воздушного зазора, который в асинхронных двигателях обычно не превышает 1 — 2 мм.

Для размещения вводного устройства на станине делают окна для выводных концов обмотки статора. На торцах станины выполняют центрирующие заточки для установки подшипниковых щитов. При массе двигателя 30 кг и более на станине крепят один или два рым-болта, облегчающие подъем двигателя при его транспортировке. В нижней части станины отливают или приваривают лапы для установки машины на месте ее эксплуатации.

На двигателе имеются винтовые зажимы для заземления с элементами, предотвращающими самоотвинчивание. Один из зажимов располагают в коробке выводов и еще один или два — на станине или подшипниковом щите.

Вал двигателя несет на себе сердечник ротора с обмоткой. При этом вал испытывает действие вращающего и изгибающего моментов. Последний создается радиальными силами реакции механической передачи. Кроме того, в двигателях горизонтального расположения вал испытывает изгибающее усилие от сил одностороннего магнитного тяжения. Действие всех перечисленных сил определяет требования к валу двигателя: вал должен быть прочным во всех своих сечениях и достаточно жестким, чтобы прогиб вала не превышал допустимого значения — не более 5 % от размера воздушного зазора.

Подшипниковые щиты служат для передачи механических усилий от вала к станине. Подшипниковые щиты обычно изготавливают из алюминия или чугуна. В двигателях защищенного исполнения (IP23) подшипниковые щиты имеют отверстия для прохода воздуха, прикрытые жалюзи.

Наиболее распространенным дефектом при сборке двигателей является перекос подшипниковых щитов,

который ведет к появлению вибраций и интенсивному износу подшипников.

В центральной части подшипниковых щитов имеются отверстия под подшипник. В щитах из алюминиевого сплава это отверстие упрочняют (армируют) стальной втулкой, что дает возможность неоднократной разборки подшипникового узла без нарушения места посадки подшипника. В двигателях малой и средней мощности преимущественно применяют подшипники качения (шарики- или роликоподшипники). Наибольшая нагрузка приходится на подшипник на стороне выступающего конца вала, поэтому в некоторых двигателях ($h \geq 160$ мм) с этой стороны применяют роликоподшипник (см. рис. 3.8). В этом случае наружные кольца обоих подшипников (роликового и шарикового) зажимаются подшипниковыми крышками, так как роликовый подшипник обеспечивает возможность осевых перемещений вала, компенсируя при сборке двигателя возможные неточности в осевых размерах вала, станины, щитов, а также различие тепловых деформаций перечисленных деталей при нагреве двигателя.

Если же оба подшипника двигателя шариковые (обычно при высоте оси вращения $h < 160$ мм), то для возможности осевого перемещения подшипника под действием теплового удлинения вала между заточками наружных подшипниковых крышек и наружными кольцами шарикоподшипников закладывают пружинные шайбы в виде гофрированного стального кольца (рис. 3.9). Наличие указанных колец способствует снижению вибраций двигателя. В менее ответственных случаях один из подшипников закрепляют крышками плотно, а другой устанавливают с осевым зазором.

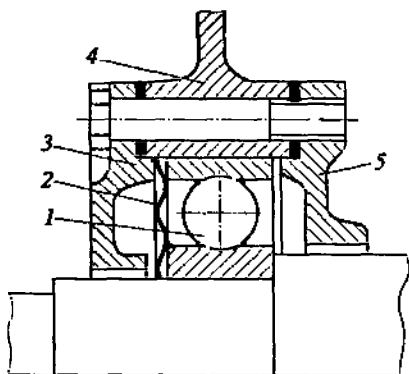


Рис. 3.9. Подшипниковый узел:

1 — подшипник; 2 — пружинная шайба; 3 — наружная крышка; 4 — подшипниковый щит; 5 — внутренняя крышка

Внутреннее кольцо подшипника качения плотно насаживают на вал и при разборке двигателя с вала не снимают, а наружное кольцо входит в подшипниковый щит подвижно, что облегчает сборку и разборку двигателя.

Для нормальной работы подшипников необходима смазка, которая уменьшает трение в подшипниках, предохраняет их от коррозии и препятствует попаданию в них грязи, снижает шумы в подшипниках и способствует отводу теплоты, предохраняя подшипники от чрезмерного перегрева.

Для подшипников качения возможно применение смазок двух видов — жидких и консистентных. Жидкие смазки по сравнению с консистентными имеют меньший коэффициент трения, лучше отводят теплоту, способны проникать в узкие зазоры и вымывать продукты износа подшипников. Однако жидкие смазки требуют применения сложных уплотнительных устройств, предотвращающих вытекание смазок, и нуждаются в тщательном уходе за смазочной системой. Поэтому в машинах с подшипниками качения жидкие смазки применяют

лишь при больших окружных скоростях (обычно при $dn > 300\,000$, где d — диаметр вала, мм; n — частота вращения, об/мин).

Наибольшее применение для смазки подшипников качения получили консистентные смазки. Они представляют собой высоковязкие мази, получаемые путем загущения масел. Важнейшими свойствами этих смазок являются высокая температура каплепадения, прилипаемость к поверхности трения, стабильность. В современных электрических машинах применяют тугоплавкие консистентные смазки с температурой разжижения 150—200 °С.

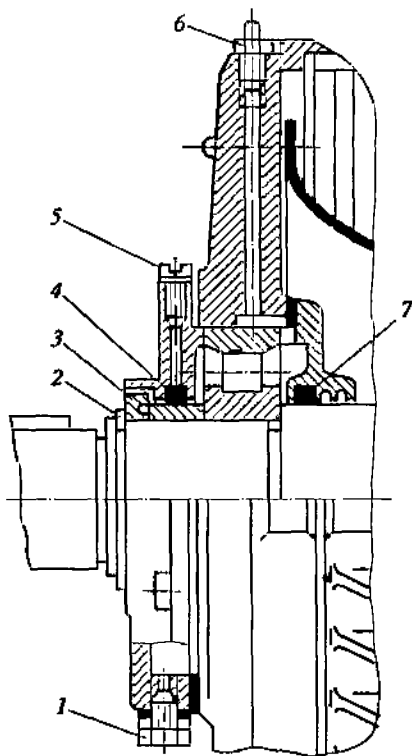


Рис. 3.10. Подшипниковый узел с устройством для пополнения смазки:

1 — пробка спускного канала; 2 — стопорное кольцо; 3 — кольцо уплотнения; 4, 7 — войлочные кольца; 5 — пробка; 6 — масленка

Важным элементом подшипникового узла электрических машин является уплотнение, защищающее подшипник от пыли, грязи, металлической стружки, а также препятствующее вытеканию смазки в полость машины. Наибольшее применение в электрических машинах с консистентной смазкой получили уплотнения в виде кольцевых лабиринтных канавок (проточек), выполненных на подшипниковых крышках (рис. 3.10). При сборе подшипниковых узлов лабиринтные канавки и полости крышек заполняют консистентной смазкой. В некоторых конструкциях в одну из кольцевых канавок вставляют войлочные кольца 4 и 7, внутренняя поверхность которых прижимается к валу.

В подшипниковых узлах некоторых асинхронных двигателей с $h \geq 160$ мм возможно применение устройства для пополнения смазки без разборки двигателя (см. рис. 3.10). Свежую смазку посредством шприца под давлением подают через отверстие масленки 6 под крышку подшипника. Отработанная смазка при этом выжимается и удаляется через спускной канал, при нормальной эксплуатации закрытый пробкой 1.

3.4. Конструкция трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором

Статор с обмоткой такого двигателя в принципе не отличается от асин-

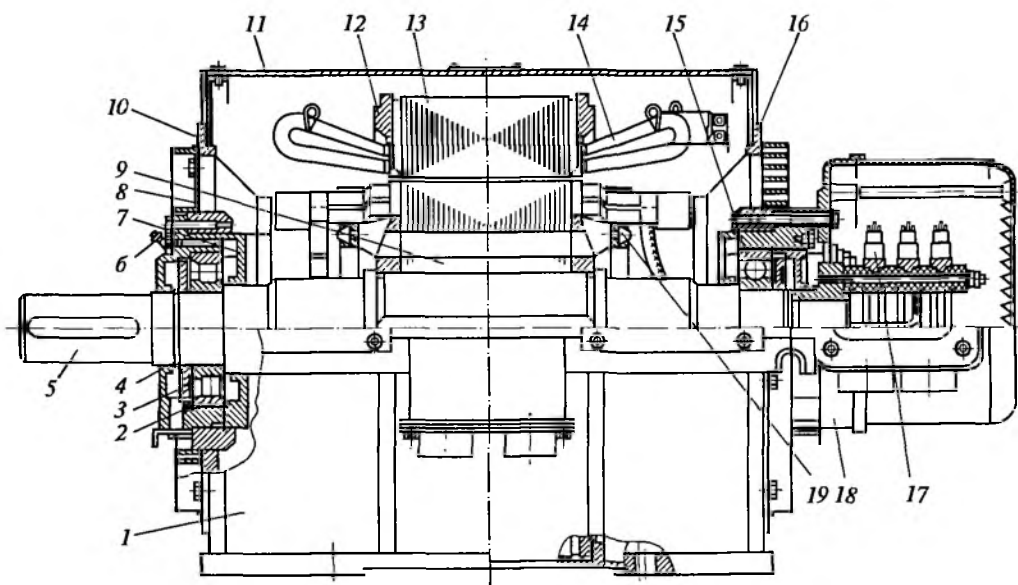


Рис. 3.11. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором исполнения по степени защиты IP23 (200 кВт, 380/660 В, $2p = 4$):

1 — полустанина; 2, 15 — подшипники; 3 — шайба для сброса отработанной смазки; 4 — пружинное кольцо; 5 — вал; 6 — масленка; 7 — крышка подшипника внутренняя; 8 — жалюзи; 9 — сердечник ротора; 10, 16 — подшипниковые щиты; 11 — кожух; 12 — шайба для предотвращения распухания пластин сердечника статора; 13 — сердечник статора; 14 — лобовая часть обмотки статора; 17 — контактные щетки; 18 — узел контактных колец; 19 — балансирные грузики ротора

хронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Что же касается фазного ротора, то его сердечник имеет трехфазную двухслойную обмотку, выполненную изолированными обмоточными проводами по типу обмотки статора, с тем же числом полюсов. Фазные обмотки ротора соединены «звездой», а три конца подключены к трем контактными кольцам. При наложении на эти кольца щеток возникает конструкция, позволяющая электрически соединить вращающийся ротор с устройствами, находящимися вне двигателя. На рис. 3.11 показано устройство (продольный разрез) асинхронного двигателя с фазным ротором. Здесь контактные кольца и щетки вынесены в отдельный узел 18, прикрепленный к правому подшипниковому щиту 16, а провода от обмотки фазного ротора подведены к контактными кольцам через полую часть вала 5. Других принципиальных отличий от двигателя с

короткозамкнутым ротором данный двигатель не имеет.

Сравнение асинхронных двигателей с короткозамкнутым и двигателей с фазным роторами позволяет сделать выводы: двигатели с короткозамкнутым ротором проще по конструкции и имеют меньшие габариты, а следовательно, они надежнее и дешевле двигателей с фазным ротором. Однако по своим пусковым и регулировочным свойствам они уступают двигателям с фазным ротором, так как в этих двигателях имеется возможность посредством пускового реостата, включенного в цепь ротора, увеличить пусковой момент и уменьшить пусковой ток. Кроме того, посредством реостата возможно изменять форму механических характеристик, что определяет их успешное применение в регулируемом электроприводе подъемных механизмов и других устройств.

ГЛАВА 4

СВОЙСТВА ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

4.1. Основные уравнения и электрическая схема замещения асинхронного двигателя

Из рассмотренного ранее следует, что асинхронный двигатель аналогичен трансформатору: обмотка статора является первичной обмоткой, а обмотка ротора — вторичной. Как и в трансформаторе, эти обмотки не имеют электрической связи, а передача энергии из обмотки статора в обмотку ротора происходит исключительно за счет магнитной связи между этими

обмотками в воздушном зазоре асинхронной машины. Принципиальное отличие от трансформатора состоит в том, что обмотка ротора (вторичная обмотка) является вращающейся. По этой причине параметры ротора рассматривают как параметры вторичной обмотки трансформатора, вводя в них уточнение в виде показателя работы асинхронного двигателя — скольжения.

ЭДС фазной обмотки статора

$$E_1 = 4,44 f_1 \Phi w_1 k_{об1}; \quad (4.1)$$

ЭДС фазной обмотки ротора, вращающегося со скольжением s ,

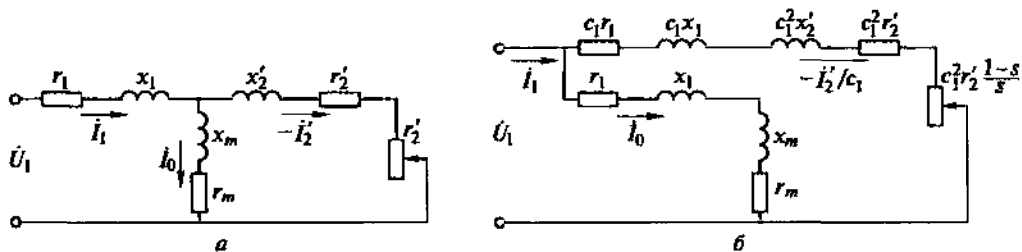


Рис. 4.1. Т-образная (а) и Г-образная (б) схемы замещения асинхронного двигателя

$$E_{2s} = 4,44f_2\Phi w_2k_{o62} = \\ = 4,44f_1s\Phi w_2k_{o62} = E_2s, \quad (4.2)$$

где Φ — основной магнитный поток асинхронного двигателя; $f_2 = f_1s$ — частота тока в обмотке ротора; k_{o61} и k_{o62} — обмоточные коэффициенты статора и ротора (для короткозамкнутого ротора $k_{o62} = 1$); w_1 и w_2 — число последовательно соединенных витков в фазных обмотках статора и ротора (для короткозамкнутого ротора $w_2 = 0,5$, а число фаз равно числу стержней Z_2); E_2 — ЭДС неподвижного ротора при скольжении $s = 1$.

Уравнения ЭДС для трехфазного асинхронного двигателя:

для цепи статора

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1x_1 + \dot{I}_1r_1; \quad (4.3)$$

для цепи короткозамкнутого ротора

$$0 = \dot{E}_2' - j\dot{I}_2'x_2' - \dot{I}_2'r_2'/s; \quad (4.4)$$

уравнение токов

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2'), \quad (4.5)$$

где x_1 и r_1 — индуктивное и активное сопротивления фазной обмотки статора; x_2' и r_2' — индуктивное и активное сопротивления фазной обмотки ротора, приведенные к числу фаз и числу витков обмотки статора; $\dot{I}_0$ — ток холостого хода двигателя; $\dot{I}_2'$ — ток ротора, приведенный к числу фаз и числу витков обмотки статора,

$$\dot{I}_2' = \dot{I}_2 \frac{m_2 w_2 k_{o62}}{m_1 w_1 k_{o61}}, \quad (4.6)$$

где m_1 и m_2 — число фаз в обмотках статора и ротора соответственно.

Этим уравнениям соответствует Т-образная электрическая схема замещения асинхронного двигателя (рис. 4.1, а). После несложных преобразований получаем Г-образную схему замещения асинхронного двигателя (рис. 4.1, б), содержащую уточняющий коэффициент $c_1 = U_1/E_1$, который для двигателей мощностью 3 кВт и более составляет 1,05—1,03. Учитывая столь малое значение коэффициента, при практических расчетах с целью упрощения принимают $c_1 \approx 1$. С учетом этого запишем выражение тока в цепи ротора асинхронного двигателя:

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{(r_1 + r_2'/s)^2 + x_k^2}}, \quad (4.7)$$

где $x_k = x_1 + x_2'$ — индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом.

4.2. Потери и КПД асинхронной машины

Взаимное преобразование электрической и механической энергий в электрической машине сопровождается потерями. В асинхронном двигателе эти потери разделяются на магнитные,

электрические, механические и дополнительные.

Магнитные потери P_M обусловлены перемагничиванием сердечников вращающимся магнитным полем. Сердечник статора перемагничивается с частотой сети f_1 ; при этом учитывают потери на гистерезис P_H и вихревые токи $P_{вт}$:

$$P_M = P_H + P_{вт}. \quad (4.8)$$

Магнитные потери во вращающемся сердечнике ротора незначительны, так как частота его перемагничивания обычно не превышает 5 Гц. В практических расчетах эти потери не учитываются.

Механические потери $P_{мех}$ — это потери на трение в подшипниках и на вентиляцию (при самовентиляции машины), а в двигателях с фазным ротором это еще и потери на трение щеток о контактные кольца (см. рис. 3.11). Механические потери пропорциональны квадрату частоты вращения ротора, поэтому в асинхронных двигателях они, так же как и магнитные потери, практически не зависят от нагрузки и в сумме с ними составляют *постоянные потери* асинхронного двигателя:

$$P_{\text{пост}} = P_M + P_{\text{мех}}.$$

На преодоление сил трения затрачивается часть электромагнитного момента, развиваемого на роторе двигателя, называемого *моментом холостого хода* M_0 .

Оставшуюся часть момента $M_2 = M - M_0$ называют *полезным моментом*, или моментом на валу двигателя.

Электрические потери $P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}$ складываются из потерь в обмотках статора и ротора. Эти потери пропорциональны квадрату тока в соответствующей обмотке:

в обмотке статора, Вт,

$$P_{\Sigma 1} = m_1 I_1^2 r_1, \quad (4.9)$$

в обмотке ротора, Вт,

$$P_{\Sigma 2} = m_2 I_2^2 r_2. \quad (4.10)$$

В этих выражениях активные сопротивления обмоток статора r_1 и ротора r_2 должны быть приведены к рабочей температуре обмоток (см. табл. 2.13).

Так как токи I_1 и I_2 в обмотках зависят от механической нагрузки на вал двигателя, то электрические потери также зависят от нагрузки. Для расчета электрических потерь при разных токах нагрузки можно воспользоваться понятием *коэффициента нагрузки* $\beta = I/I_{\text{ном}}$, где $I_{\text{ном}}$ — номинальное значение тока нагрузки в рассматриваемой обмотке.

Пользуясь понятием коэффициента нагрузки, запишем формулы для расчета электрических потерь при номинальных нагрузках:

$$P_{\Sigma 1} = \beta^2 P_{\Sigma, \text{ном} 1};$$

$$P_{\Sigma 2} = \beta^2 P_{\Sigma, \text{ном} 2},$$

где $P_{\Sigma, \text{ном} 1}$ и $P_{\Sigma, \text{ном} 2}$ — электрические потери в обмотках двигателя в режиме номинальной нагрузки.

Электрические потери в обмотке ротора пропорциональны скольжению:

$$P_{\Sigma 2} = s P_{\Sigma \Sigma},$$

где $P_{\Sigma \Sigma}$ — *электромагнитная мощность*, т. е. мощность, передаваемая через воздушный зазор δ между статором и ротором в ротор двигателя,

$$P_{\Sigma \Sigma} = P_1 - (P_M + P_{\Sigma 1});$$

P_1 — *мощность, потребляемая двигателем из сети*,

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

$\cos \varphi_1$ — коэффициент мощности асинхронного двигателя; $P_{\Sigma 1}$ — электрические потери в обмотке статора, Вт.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя, Н·м,

$$M = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega_1} = \frac{m_1 I_2'^2 (r_2'/s)}{\omega_1}, \quad (4.11)$$

где ω_1 — синхронная угловая скорость вращения поля статора, рад/с,

$$\omega_1 = 2\pi \frac{n_1}{60} = 0,105n_1. \quad (4.12)$$

Следует помнить, что в каталогах и другой технической документации на электрические машины скорость вращательного движения измеряется частотой вращения n , об/мин,

$$n = 9,55\omega.$$

Из выражения $P_{\text{э2}} = sP_{\text{эм}}$ следует, что работа асинхронного двигателя наиболее экономична при малом скольжении, соответствующем минимальным электрическим потерям в обмотке ротора.

Добавочные потери включают все виды трудно учитываемых потерь (пульсационные потери, потери от высших гармонических составляющих и т. п.). Эти потери принимают 0,5 % от подводимой к двигателю мощности:

$$P_{\text{доб. ном}} = 0,005P_{\text{ном}}. \quad (4.13)$$

Добавочные потери зависят от нагрузки двигателя:

$$P_{\text{доб}} = \beta^2 P_{\text{доб. ном}}.$$

В двигателях с фазным ротором имеют место **электрические потери в контакте щеток**, являющиеся также переменными потерями:

$$\begin{aligned} P_{\text{э. щ}} &= 3I_2 \Delta U_{\text{щ}} = \\ &= 3\beta I_{2\text{ном}} \Delta U_{\text{щ}}, \end{aligned} \quad (4.14)$$

где $\Delta U_{\text{щ}}$ — переходное падение напряжения на пару щеток, В (см. табл. 2.14).

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P}, \quad (4.15)$$

где $\sum P$ — суммарные потери в двигателе:

$$\begin{aligned} \sum P &= P_{\text{пост}} + P_{\text{пер}} = P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} + \\ &+ P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{э. щ}} + P_{\text{доб}}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

КПД асинхронных двигателей достаточно высок и в двигателях средней и большой мощности составляет 0,85—0,92. Большие значения КПД относятся к двигателям более высокой номинальной мощности.

4.3. Электромагнитный момент асинхронной машины

Электромагнитный момент асинхронной машины, Н·м,

$$M = \pm \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 s [(r_1 + r_2'/s)^2 + x_k^2]}, \quad (4.17)$$

где U_1 — напряжение питающей сети; f_1 — частота тока в этой сети; r_1 — активное сопротивление фазы обмотки статора; r_2' — приведенное значение активного сопротивления фазы обмотки ротора; s — скольжение; $x_k = x_1 + x_2'$ — индуктивное сопротивление асинхронной машины в режиме короткого замыкания.

Задавшись рядом значений скольжения s от $+\infty$ до $-\infty$, включая $s = 0$ и $s = 1$, и считая все остальные величины, входящие в формулу момента, неизменными, получим ряд значений электромагнитного момента, используя которые, построим **механическую характеристику** $M = f(s)$ асинхронной машины (рис. 4.2). При этом определились три возможных режима работы асинхронной машины: двигательный (основной) режим в диапазоне скольжений от 0 до 1, генераторный режим в диапазоне скольжений от 0 до $-\infty$ и тормозной режим противо-

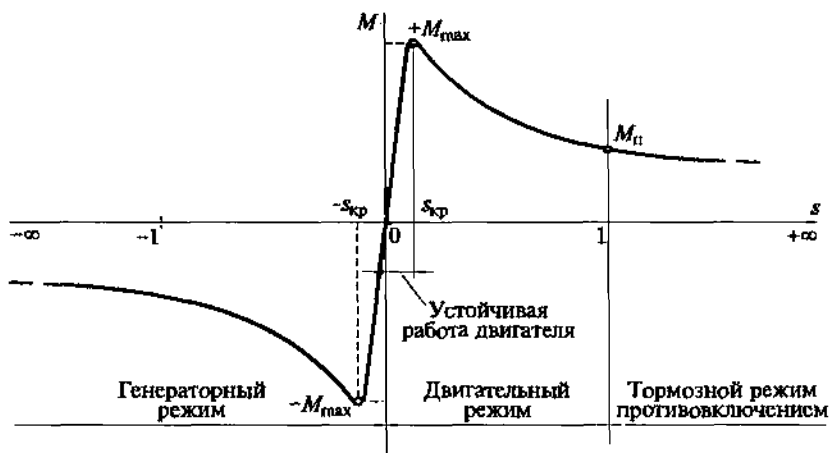


Рис. 4.2. Механическая характеристика асинхронной машины

включением в диапазоне скольжения от 1 до $+\infty$. В последнем случае вращение ротора направлено встречно электромагнитному моменту.

Скольжение, соответствующее максимальному моменту, называют *критическим*:

$$s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}. \quad (4.18)$$

Подставив значение $s_{кр}$ по формуле, получим выражение максимального момента асинхронной машины

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 \left(\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2} \right)}. \quad (4.19)$$

В этих выражениях знак плюс соответствует двигательному, а знак минус генераторному режимам работы асинхронной машины. Максимальное значение момента в генераторном режиме несколько больше, чем в двигателе.

Обычно в практических расчетах критического скольжения $s_{кр}$ и максимального момента $M_{\max}$ пользуются упрощенными формулами, полученными исключением активного со-

противления фазной обмотки статора r_1 , которое намного меньше величины x_k :

$$s_{кр} \approx \pm \frac{r_2'}{x_k};$$

$$M_{\max} \approx \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 x_k}. \quad (4.20)$$

Электромагнитный момент, соответствующий скольжению $s = 1$ (ротор неподвижен), называют *пусковым моментом*:

$$M_n = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 (r_k^2 + x_k^2)}, \quad (4.21)$$

где $r_k = r_1 + r_2'$ — активное сопротивление фазной обмотки асинхронного двигателя в режиме короткого замыкания, Ом.

Существенное отличие асинхронных двигателей от двигателей другого принципа действия вызвано способом возбуждения асинхронных двигателей, т. е. способом создания в нем магнитного поля. В синхронных и коллекторных двигателях основной магнитный поток возбуждения создается специ-

альной обмоткой возбуждения, получающей питание от источника постоянного тока. В асинхронных двигателях такой обмотки нет и их возбуждение происходит посредством обмотки статора, которая одновременно является и обмоткой возбуждения, и рабочей обмоткой, через которую поступает в двигатель электрическая энергия, преобразуемая в механическую энергию. Магнитное поле создается реактивной (индуктивной) мощностью, поступающей в асинхронный двигатель из сети и создающей в этой сети значительный реактивный (индуктивный) ток. Это обстоятельство неблагоприятно влияет на энергетические показатели электрической сети, в которую включены асинхронные двигатели, вызывая в линейных проводах возрастание тока $I_{\text{лин}}$ за счет его реактивной составляющей. В результате электрические потери, пропорциональные квадрату тока в этих проводах ($I_{\text{лин}}^2 R_{\text{лин}}$), возрастают. Далее будут рассмотрены средства, снижающие этот недостаток асинхронных двигателей (см. 11.3).

4.4. Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя

На рис. 4.3 построена механическая характеристика асинхронного двигателя в относительных единицах $M^* = f(s)$ для диапазона скольжения от $s = 0$ до $s = 1$, где M^* — относительное значение электромагнитного момента, т.е. его значение относительно номинального значения момента $M_{\text{ном}}$, Н·м,

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}, \quad (4.22)$$

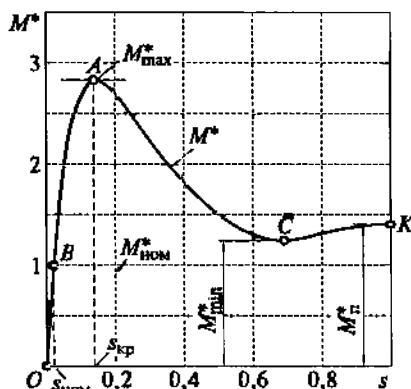


Рис. 4.3. Механическая характеристика асинхронного двигателя

где $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность двигателя, кВт; $n_{\text{ном}}$ — номинальная частота вращения ротора, об/мин.

На этой характеристике отмечены характерные точки:

K — точка короткого замыкания двигателя, соответствующая начальному моменту пуска $M_{\text{п}}^* = M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$, когда скольжение $s = 1$, а ротор неподвижен ($n_2 = 0$);

C — точка некоторого снижения момента до значения $M_{\text{мин}}^*$ в процессе разгона двигателя, обычно это снижение составляет 10—15 % номинального момента;

A — точка максимального момента $M_{\text{мах}}^* = M_{\text{мах}}/M_{\text{ном}}$, соответствующая критическому значению скольжения $s_{\text{кр}}$ или критической частоте вращения $n_{\text{кр}} = n_1(1 - s_{\text{кр}})$; величина $M_{\text{мах}}^*$ определяет *перегрузочную способность* асинхронного двигателя, так как при нагрузочном моменте двигателя $M^* \geq M_{\text{мах}}^*$ рост нагрузки на валу двигателя сопровождается уменьшением электромагнитного момента. При этом устойчивая работа двигателя прекращается, электромагнитный момент двигателя уменьшается до значения $M_{\text{п}}^*$ и ротор двигателя останавливается, т.е. сколь-

жение увеличивается до $s = 1$, а частота вращения уменьшается до $n = 0$. В итоге наступает режим короткого замыкания двигателя. Этот режим работы двигателя является аварийным, так как сопровождается недопустимым увеличением тока в обмотках двигателя. Если в этот момент двигатель не отключить от сети (должна сработать тепловая защита двигателя — плавкие предохранители или тепловые реле), то от чрезмерно интенсивного перегрева обмотки двигателя могут загореться, что создаст опасность возникновения пожара. При этом двигатель выходит из строя. Чтобы случайные кратковременные перегрузки двигателя или чрезмерные колебания напряжения в питающей сети не привели к короткому замыканию, необходимо, чтобы двигатель имел запас перегрузочной способности ($M_{\text{пmax}}^* = 2,0 - 3,0$);

B — точка номинальной нагрузки двигателя с координатами: момент $M_{\text{ном}}^* = 1$ и скольжение $s_{\text{ном}}$ или частота вращения ротора

$$n_{\text{ном}} = n_1(1 - s_{\text{ном}}); \quad (4.23)$$

O — точка идеального холостого хода с координатами: момент $M^* = 0$, скольжение $s = 0$ или частота вращения ротора $n_2 = n_1$.

Участок механической характеристики OA , соответствующий значениям скольжения $s < s_{\text{кр}}$, называют *рабочим участком*, поскольку именно на этом участке работа двигателя устойчива, так как изменение механической нагрузки на валу двигателя сопровождается соответствующим изменением электромагнитного момента. В асинхронных двигателях общего назначения критическое скольжение не превышает $0,1 - 0,12$, а номинальное скольжение обычно составляет $0,02 - 0,05$. Поэтому работа двигателя на рабочем

участке механической характеристики является не только устойчивой, но к тому же и наиболее экономичной, так как соответствует малым значениям скольжения, а следовательно, и небольшим потерям в обмотке ротора, величина которых пропорциональна скольжению $P_{\Sigma 2} = sP_{\Sigma \text{м}}$.

Построение механической характеристики асинхронного двигателя с использованием формулы электромагнитного момента составляет определенные трудности, так как значения параметров схемы замещения двигателя в каталогах не приводятся. Кроме того, эти параметры при скольжениях, превышающих критическое значение, а тем более близких к единице, изменяют свои значения и отличаются от аналогичных значений, соответствующих скольжению рабочего участка механической характеристики. Это связано с тем, что при больших токовых нагрузках, соответствующих скольжению, близкому к единице, происходит насыщение зубцов сердечников статора и ротора, что влияет на магнитные потоки рассеяния, а следовательно, и на индуктивное сопротивление $x_{\Sigma} = x_1 + x_2'$. Кроме того, при малой частоте вращения ротора растет частота тока в обмотке ротора, да к тому же усиливается эффект вытеснения тока в обмотке ротора.

В каталогах на асинхронные двигатели обычно приводятся: номинальная мощность двигателя $P_{\text{ном}}$, номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$ или номинальное скольжение $s_{\text{ном}}$, а также кратности отношений моментов $M_{\text{пmax}}/M_{\text{ном}}$; $M_{\text{мин}}/M_{\text{ном}}$; $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$. Поэтому, рассчитав номинальный момент, можно определить значения всех моментов, определяющих точки, отмеченные на механической характеристике асинхронного двигателя (см. рис. 4.3).

При практических расчетах часто используют упрощенную формулу момента, известную под названием *формулы Клосса*:

$$M \approx \frac{2M_{\max}}{s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s}, \quad (4.24)$$

где критическое скольжение определяют по приближенной формуле

$$s_{\text{кр}} \approx s_{\text{ном}} \left(\lambda_{\text{м}} + \sqrt{\lambda_{\text{м}}^2 - 1} \right), \quad (4.25)$$

$\lambda_{\text{м}} = M_{\max}/M_{\text{ном}}$ — перегрузочная способность двигателя.

Таким образом, посредством приведенных выражений можно, используя данные каталога, построить механическую характеристику асинхронного двигателя.

4.5. Влияние напряжения сети и активного сопротивления обмотки ротора на механическую характеристику асинхронного двигателя

Из формул электромагнитного момента следует, что электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения, подведенного к фазной обмотке статора ($M \propto U_1^2$). В то же время анализ формулы критического скольжения показывает, что скольжение $s_{\text{кр}}$ не зависит от напряжения U_1 , но пропорционально активному сопротивлению обмотки ротора r_2' . Все это позволяет построить механические характеристики двигателя $M = f(s)$ для ряда значений напряжения, подведенного к обмотке статора двигателя: $U_1 = U_{\text{ном}}$; $U_1' < U_{\text{ном}}$ и $U_1'' > U_{\text{ном}}$ (рис. 4.4). Из этих графиков видим, что колебания напряжения U_1 относительно его но-

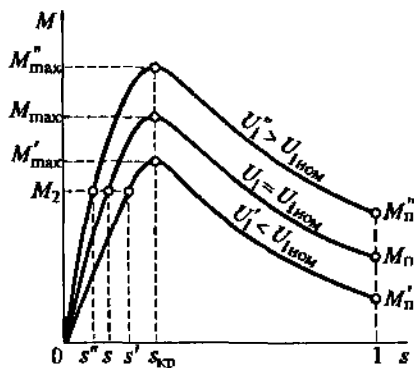


Рис. 4.4. Влияние напряжения сети на механические характеристики асинхронного двигателя

минального значения сопровождаются изменениями максимального момента ($M_{\max}$, $M'_{\max}$, $M''_{\max}$) и пускового момента ($M_{\text{п}}$, $M'_{\text{п}}$, $M''_{\text{п}}$), а также скольжения (s , s' , s'') и частоты вращения ротора, соответствующей этому скольжению, (n , n' , n'').

Перегрузочная способность асинхронного двигателя изменяется пропорционально квадрату напряжения питающей сети U_1^2 , т.е. она очень чувствительна к колебаниям напряжения сети. Например, если напряжение сети уменьшится до $0,8U_{\text{ном}}$, то перегрузочная способность уменьшится в $0,8^2 = 0,64$ раза, т.е. на 36 %.

Рассмотрим влияние активного сопротивления обмотки ротора r_2' на форму механической характеристики асинхронного двигателя. Из формулы максимального момента (4.19) видим, что максимальный момент $M_{\max}$ не зависит от активного сопротивления ротора r_2' , а критическое скольжение $s_{\text{кр}}$ пропорционально сопротивлению ротора r_2' [см. (4.18)]. На рис. 4.5 изображено несколько механических характеристик асинхронного двигателя для ряда нарастающих значений активного сопротивления ротора $r'_{21} < r'_{22} < r'_{23} < r'_{24}$.

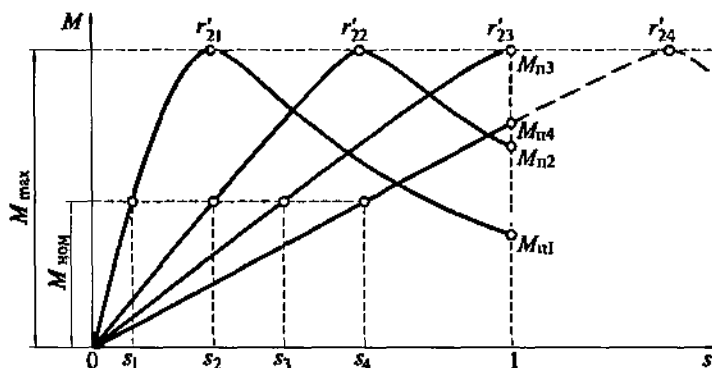


Рис. 4.5. Влияние активного сопротивления обмотки ротора на механические характеристики асинхронного двигателя

Все характеристики имеют одинаковую амплитуду ($M_{\max} = \text{const}$), но разные значения критического скольжения $s_{\text{кр}}$. С увеличением r'_2 до определенного значения (r'_{23}) начальный пусковой момент возрастает до максимального значения $M_{\text{п3}} = M_{\max}$; при $r'_{24} > r'_{23}$ пусковой момент уменьшается: $M_{\text{п4}} < M_{\max}$. При этом скольжение, соответствующее заданному нагрузочному моменту $M_2 = M_{\text{ном}}$, возрастает ($s_1 < s_2 < s_3 < s_4$), а частота вращения ротора $n_2 = n_1(1 - s)$ уменьшается.

Таким образом, изменяя активное сопротивление в цепи ротора, можно влиять на основные свойства асинхронного двигателя — частоту вращения и начальный пусковой момент. В асинхронных двигателях с фазным ротором (см. рис. 3.11) регулирование сопротивления цепи ротора осуществляется введением в цепь ротора активного добавочного сопротивления.

4.6. Рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимость частоты вращения рото-

ра n_2 , полезного (нагрузочного) момента на валу M_2 , тока статора I_1 , коэффициента мощности $\cos \phi_1$ и КПД η от полезной мощности двигателя P_2 .

На рис. 4.6 показан примерный вид рабочих характеристик трехфазного асинхронного двигателя, построенных в относительных единицах, представляющих собой отношение фактического значения рассматриваемой величины к ее номинальному либо другому фиксированному значению: $n_2^* = n_2/n_1$; $M_2^* = M_2/M_{2\text{ном}}$; $I_1^* = I_1/I_{1\text{ном}}$; $P_2^* = P_2/P_{\text{ном}}$.

Зависимость частоты вращения $n_2^* = f(P_2^*)$ имеет вид графика, слабо наклоненного к оси абсцисс, поскольку трехфазные асинхронные двигатели работают с небольшим скольжением, которое даже при номинальной нагрузке обычно не превышает 0,05. При этом частота вращения ротора с ростом нагрузки уменьшается пропорционально величине $(1 - s)$, т.е.

$$n_2^* = \frac{n_1(1 - s)}{n_1} = 1 - s.$$

Зависимость полезного момента $M_2^* = f(P_2^*)$ определяется выражением

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n_2}, \quad (4.26)$$

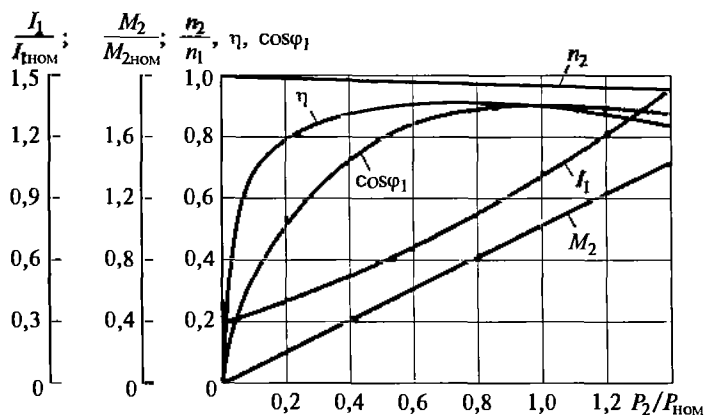


Рис. 4.6. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя

где n_2 — частота вращения ротора, об/мин.

Так как с увеличением нагрузки P_2 частота вращения n_2 уменьшается, то график $M_2^* = f(P_2^*)$, выходя из начала координат, с ростом P_2^* несколько отклоняется от прямой линии.

Зависимость тока статора $I_1^* = f(P_2^*)$ представляет собой график, не выходящий из начала осей координат, так как двигатель в режиме холостого хода ($P_2 = 0$) потребляет из сети ток холостого хода I_{10} , значение которого у асинхронных двигателей может составлять от 20 до 40 % от номинального значения тока статора (большее значение относится к двигателям меньшей мощности). Такое повышенное значение тока холостого хода объясняется наличием в двигателе воздушного зазора между статором и ротором, что способствует росту намагничивающего двигателя тока. Действие этого зазора усиливается тем, что он ограничен с двух сторон зубцовым слоем, заполненным немагнитными материалами (пазовые стороны обмоток и изоляция).

Зависимость коэффициента мощности $\cos \varphi_1 = f(P_2^*)$ показывает, что

коэффициент мощности изменяется в значительном диапазоне при переходе двигателя от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки. Это объясняется тем, что при любой нагрузке, так же как и в режиме холостого хода, двигатель потребляет из сети намагничивающий (реактивный) ток приблизительно одинаковой величины. Поэтому при небольших нагрузках потребляемый из сети ток I_1^* имеет значительную реактивную составляющую, что является причиной низкого коэффициента мощности $\cos \varphi_1 = (0,15—0,20)$. С возрастанием нагрузки увеличивается активная составляющая тока статора и коэффициент мощности повышается, достигая при номинальной нагрузке значений (для двигателей мощностью до 100 кВт) $\cos \varphi_{1\text{ном}} = 0,7—0,9$ (для двигателей мощностью более 100 кВт даже до 0,95). При перегрузках двигателя заметно повышается скольжение s , а $\cos \varphi_1$ уменьшается. Объясняется это тем, что с ростом скольжения s увеличивается частота тока в роторе $f_2 = f_1 s$ и соответственно возрастает индуктивное сопротивление рассеяния $x_{2s} = x_{2s}$.

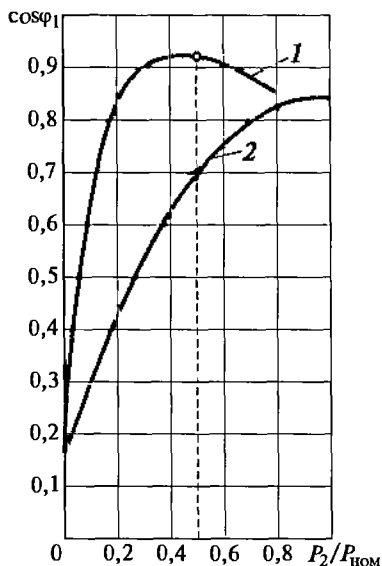


Рис. 4.7. Зависимость $\cos \varphi_1$ асинхронного двигателя от нагрузки при соединении обмотки статора «звездой» (1) и «треугольником» (2)

Таким образом, с точки зрения энергосбережения (см. 21.6), работа асинхронного двигателя при недогрузке или перегрузке *невыгодна*, так как она происходит при пониженных значениях коэффициента мощности. Коэффициент мощности при недогрузке двигателя можно несколько повысить, снизив подводимое к обмотке статора напряжение. Это возможно при питании цепи статора от регулируемого источника переменного тока. Если же двигатель работает при соединении обмотки статора в «треугольник», то с целью понижения напряжения на статоре при недогрузке двигателя его обмотку пересоединяют «звездой». При этом коэффициент мощности несколько повышается (рис. 4.7).

Зависимость КПД $\eta = f(P_2^*)$ имеет вид, характерный для электрических машин: при малых нагрузках КПД небольшой, а затем с ростом нагрузки

КПД резко увеличивается, достигая наибольшего значения при нагрузке $(0,7 - 0,9) P_2^*$, незначительно снижаясь при дальнейшем повышении нагрузки. При нагрузке, соответствующей наибольшему значению КПД, постоянные потери равны переменным (см. 4.2). Это обстоятельство используют при определении постоянных потерь двигателя.

4.7. Пусковые свойства трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, в силу ряда существенных достоинств (простота конструкции, высокие надежность и экономичность), в настоящее время составляют основу электропривода, в котором около 80 % всего парка электродвигателей составляют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Основной недостаток этих двигателей — неудовлетворительные пусковые свойства, особенно при их средней и большой мощности. По этим причинам рассмотрению вопросов преодоления этого недостатка уделяется особое внимание.

К пусковым свойствам асинхронных двигателей, как и к двигателям другого принципа действия, предъявляются следующие требования.

1. Двигатель должен создавать начальный пусковой момент, превышающий статический момент сопротивления, чтобы ротор двигателя мог прийти во вращение и достичь установившейся частоты вращения.

2. Пусковой ток не должен достигать значений, вызывающих повреждения двигателя, и создавать в сети

значительного падения напряжения, нарушающего работу других потребителей.

3. Схема пуска должна быть по возможности простой, экономичной, удобной в обслуживании; продолжительность пуска должна быть минимальной.

Пусковой ток асинхронного двигателя, A ,

$$I_{\pi} = \frac{U_1}{z_k},$$

где z_k — полное сопротивление двигателя в начальный момент пуска (режим короткого замыкания), Ом,

$$z_k = \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}. \quad (4.27)$$

Пусковой момент асинхронного двигателя

$$M_{\pi} = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 z_k^2}. \quad (4.28)$$

Исходя из требований к пусковым свойствам двигателя желательно уменьшение пускового тока и увеличение пускового момента. Однако эти требования противоречивы, так как обычно средства, способствующие повышению пускового момента, вызывают увеличение пускового тока, и наоборот.

Пусковой ток асинхронных двигателей в 5—7,5 раз может превышать номинальный. Отсутствие скользящих контактов (коллектора или контактных колец) допускает в двигателях с короткозамкнутым ротором значительные кратности пускового тока. Благодаря кратковременности процесса пуска, двигатель не успевает перегреваться. Исключение составляют приводы с частым включением или реверсированием. В остальных случаях основной причиной, ограничивающей прямое включение двигателя в сеть, является

недостаточная мощность этой сети и ударное механическое воздействие пускового момента на подвижные части двигателя и рабочей машины.

Пуск непосредственным включением в сеть применяют для асинхронных двигателей малой, а иногда и средней мощности. Предельная мощность двигателя для прямого включения в сеть определяется в каждом конкретном случае в зависимости от допустимой нагрузки для этой сети и условиями пуска двигателя (пуск в режиме холостого хода или под нагрузкой). Включение двигателей в сеть, питающую другие силовые и осветительные устройства, не должно вызывать падения напряжения в ней более чем на 5 % от номинального значения.

Основным средством уменьшения пускового тока является временное (на время пуска) понижение напряжения U_1 , подводимого к обмотке статора. На этом основаны все специальные способы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Однако следует помнить, что с понижением напряжения U_1 уменьшается *пусковой момент*, который пропорционален квадрату этого напряжения. Поэтому пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором *при пониженном напряжении* допустим лишь для случаев пуска без нагрузки или с небольшой нагрузкой на валу.

Для асинхронных двигателей, работающих при соединении обмотки статора «треугольником», обычно применяют метод пуска *переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»* (рис. 4.8). Во время подключения двигателя к сети переключатель ставят в положение Y , при этом напряжение на фазных обмотках статора понижается в $\sqrt{3}$ раз. Во столько же раз уменьшается ток в фазных об-

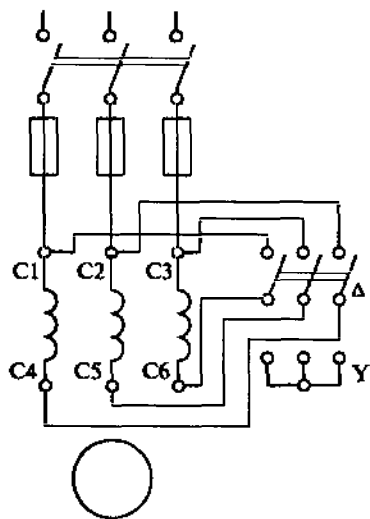


Рис. 4.8. Пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»

мотках статора, но величина тока в линейных проводах сокращается в 3 раза. Объясняется это тем, что если бы обмотка статора была соединена в «треугольник», то линейный ток был бы больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Следовательно, соединив обмотки статора «звез-

дой», мы добиваемся уменьшения линейного тока в $(\sqrt{3})^2 = 3$ раза.

После разгона ротора до частоты вращения, близкой к установившейся, переключатель переводят в положение Δ . При этом обмотки статора оказываются под линейным напряжением, что вызывает небольшой бросок тока. Однако следует иметь в виду, что при включении двигателя с соединением обмоток статора «звездой», когда напряжение на фазных обмотках понижается в $\sqrt{3}$ раз, пусковой момент уменьшается в 3 раза. Применение рассмотренного способа пуска ограничено двигателями, рассчитанными для работы при соединении обмотки статора «треугольником», при этом на панель коробки выводов должны быть выведены все шесть концов фазных обмоток статора.

Более универсальным является способ понижения напряжения посредством пусковых резисторов R_n или дросселей (реакторов) L , включаемых в линейные провода последовательно с обмоткой статора двигателя (рис. 4.9, а). Пуск двигателя происходит при срабатывании контактора КМ1 (при ра-

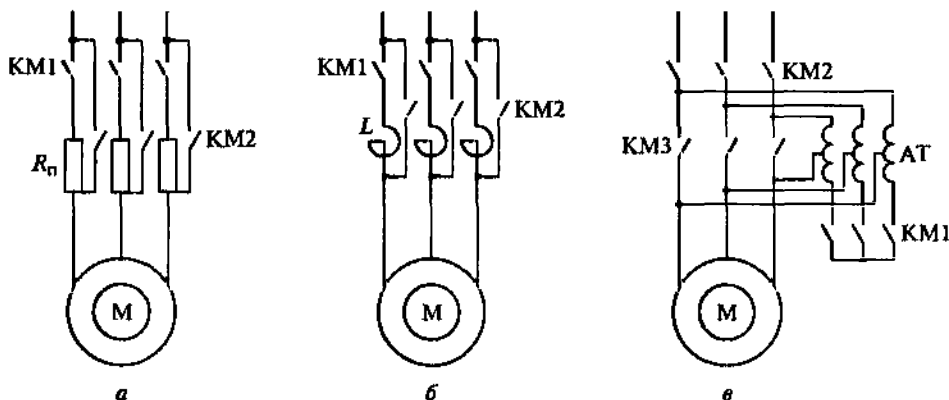


Рис. 4.9. Способы уменьшения пускового тока асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором:

а — пусковыми резисторами R_n ; б — дросселями L ; в — трехфазным автотрансформатором АТ

зомкнутых контактах контактора КМ2). За счет падения напряжения в пусковых резисторах $I_n R_n$ напряжение на зажимах обмотки статора понижается до значения U'_1 . После разгона ротора срабатывает контактор КМ2 и двигатель оказывается под номинальным напряжением сети U_1 . При этом искусственный пусковой ток по сравнению с естественным током уменьшается в $\alpha_i = (U'_1/U_1)$ раз, а искусственный пусковой момент по сравнению с естественным сокращается в $\alpha_m = \alpha_i^2$ раз. Например, если напряжение было понижено в $\sqrt{3}$ раз, то искусственный пусковой ток будет уменьшен в $\sqrt{3}$ раз, а искусственный пусковой момент — в 3 раза. Аналогично происходят процессы при использовании дросселей L (рис. 4.9, б). Однако следует помнить, что применение резисторов R_n вызывает значительные потери при пуске двигателя, пропорциональные квадрату пускового тока $P_n = I_n^2 R_n$, в то время как применение дросселей L таких потерь не вызывает, поскольку их активное сопротивление весьма незначительно.

На рис. 4.10, а показан прямоугольный треугольник сопротивлений короткого замыкания асинхронного двигателя ABC . При этом начальный пусковой ток двигателя $I_n = U_1/z_k$. Если с целью уменьшения начального пускового тока в линейные провода статора включить последовательно резисторы R_n , то катет активного сопротивления удлинится на величину R_n и треугольник примет вид ABC' , при этом полное сопротивление двигателя окажется равным z'_k и искусственный пусковой ток $I'_n = U_1/z'_k$. Таким образом, отношение искусственного пускового тока к его естественному значению обратно пропорционально отношению соответствующих полных сопротивлений:

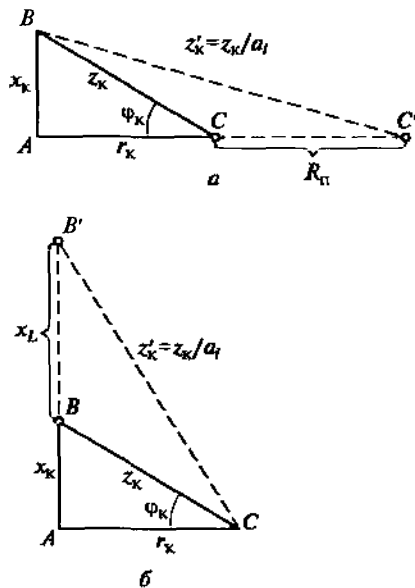


Рис. 4.10. Треугольники сопротивлений короткого замыкания при применении резисторов (а) и дросселей (б) в цепи статора для уменьшения пускового тока

$$\frac{I'_n}{I_n} = \frac{z_k}{z'_k},$$

откуда

$$z'_k = \frac{I_n}{I'_n} z_k = \frac{z_k}{\alpha_i}, \quad (4.29)$$

где

$$\alpha_i = \frac{I'_n}{I_n}$$

— коэффициент, показывающий, до какого значения уменьшится искусственный пусковой ток I'_n после включения в линейные провода статора резисторов R_n .

Из треугольника ABC' видим, что

$$z_k'^2 = x_k^2 + (r_k + R_n)^2. \quad (4.30)$$

Решая это уравнение относительно R_n , получим формулу для расчета сопротивления резистора R_n , который следует включить в линейные провода статора, чтобы искусственный пус-

ковой ток двигателя уменьшился до значения $I'_n = I_n \alpha_i$:

$$R_n = \sqrt{\left(\frac{z_k}{\alpha_i}\right)^2 - r_k^2} - r_k. \quad (4.31)$$

Если для ограничения пускового тока применены дроссели L (см. рис. 4.9, б), то, построив треугольник сопротивлений $AB'C$ (рис. 4.10, б) и проделав аналогичные преобразования, получим формулу для расчета индуктивного сопротивления дросселей, включение которых в линейные провода статора приведет к уменьшению пускового тока до требуемого значения $I'_n = I_n \alpha_i$:

$$x_L = \sqrt{\left(\frac{z_k}{\alpha_i}\right)^2 - r_k^2} - x_k, \quad (4.32)$$

где z_k — полное сопротивление двигателя в режиме короткого замыкания, Ом,

$$z_k = \frac{U_1}{I_n};$$

x_k и r_k — индуктивная и активная составляющие этого сопротивления:

$$r_k = z_k \cos \varphi_k; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Уменьшение пускового момента при включении R_n или L составит

$$M'_n = \alpha_m M_n, \quad (4.33)$$

где

$$\alpha_m = \alpha_i^2,$$

т.е. если $\alpha_i = 0,7$, то пусковой момент уменьшается до значения

$$M'_n = \alpha_i^2 M_n = 0,7^2 M_n \approx 0,5 M_n. \quad (4.34)$$

При пуске двигателя через понижающий автотрансформатор (см. рис. 4.9, в) сначала срабатывает контактор КМ1 и при разомкнутых контактах контактора КМ3 и замкнутых контактах КМ2

двигатель оказывается включенным в сеть на напряжение $U'_1 = U_1/k_A$, где k_A — коэффициент трансформации понижающего автотрансформатора АТ. При этом пусковой ток уменьшается в k_A раз, а ток в линейных проводах сети (на входе автотрансформатора) — в k_A^2 раз. Объясняется это тем, что в понижающем автотрансформаторе первичный ток меньше вторичного в k_A раз.

После разгона ротора отключается контактор КМ1 и своими контактами размыкает обмотки АТ, в итоге автотрансформатор превращается в дроссель (реактор), при этом напряжение на входе двигателя несколько повышается, что вызывает небольшой бросок пускового тока. При достижении частоты вращения, близкой к номинальной, срабатывает контактор КМ3 и двигатель оказывается под номинальным напряжением сети.

Как и при предыдущих способах пуска, основанных на понижении напряжения, автотрансформаторный пуск также сопровождается уменьшением пускового момента. В связи с повышенной стоимостью автотрансформатора и большого количества коммутирующих устройств этот способ имеет ограниченное применение. Обычно его используют для пуска асинхронных и синхронных двигателей значительной мощности.

Стремление улучшить пусковые свойства двигателей с короткозамкнутым ротором привело к созданию асинхронных двигателей с **улучшенными пусковыми свойствами**: с повышенным скольжением, глубокопазных и двухклеточных.

У асинхронных двигателей с **повышенным скольжением** короткозамкнутая обмотка ротора имеет большое активное сопротивление, что эквивалентно введению в цепь ротора добавочного

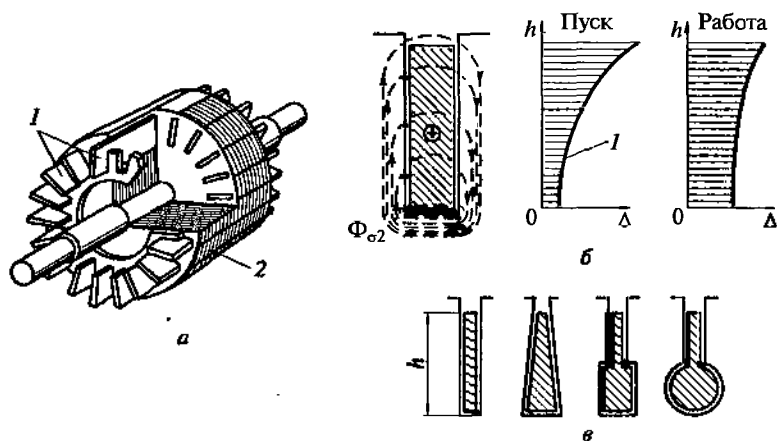


Рис. 4.11. Ротор с глубокими пазами:

a — устройство (1 — стержни; 2 — сердечник); *б* — стержень ротора и распределение плотности тока Δ по высоте стержня при пуске и работе; *в* — разновидности стержней глубокопазного ротора

резистора $r_{\text{доб}}$, а следовательно, ведет к увеличению пускового момента (см. рис. 4.5). Однако эти двигатели имеют повышенные потери в обмотке ротора, а поэтому их КПД и полезная мощность меньше, чем у асинхронных двигателей обычного исполнения.

В *глубокопазных* асинхронных двигателях для ограничения пускового тока используется эффект «вытеснения тока» в стержнях обмотки ротора. Стержни этой обмотки имеют вид узких высоких полос, замкнутых с двух сторон широкими кольцами (рис. 4.11, *a*).

При пуске двигателя, когда частота переменного тока в роторе равна частоте тока сети, индуктивное сопротивление в *нижних* слоях этих стержней повышено из-за значительных значений частоты тока $f_2 = f_1$ и потока рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$ (рис. 4.11, *б*). Поэтому ток ротора проходит главным образом по слоям стержней, обращенных к воздушному зазору, где индуктивное сопротивление стержней понижено, что эквивалентно повышению активного сопротивления обмотки ротора. По мере разгона ротора скольжение, а

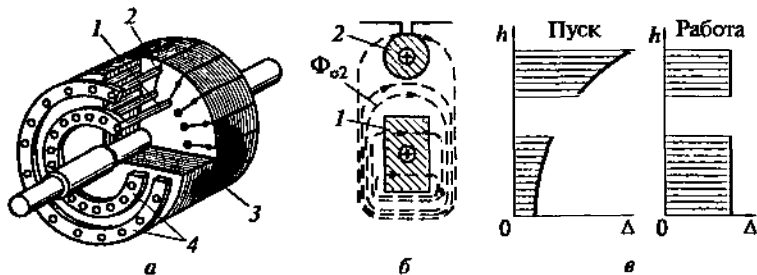


Рис. 4.12. Ротор двухклеточный:

a — устройство (1 — рабочая обмотка; 2 — пусковая обмотка; 3 — сердечник ротора; 4 — замыкающие кольца); *б* — расположение стержней в пазу (1 — стержень рабочей обмотки; 2 — стержень пусковой обмотки); *в* — распределения плотности тока в стержнях при пуске и работе

Таблица 4.1. Технические данные асинхронных двигателей с различной конструкцией короткозамкнутого ротора

Тип короткозамкнутого ротора	Марка двигателя	$P_{ном},$ кВт	$\delta_{ном},$ %	$\eta_{ном},$ %	$I_n/I_{ном}$	$M_n/M_{ном}$
Обычный	АО2-91	75	2	92,5	7,0	1,1
С повышенным активным сопротивлением	АОС2-91	61	6	86	7,0	2,9
С глубокими пазами	АОП2-91	75	1,6	92	7,5	2,1

также частота тока в обмотке ротора уменьшаются ($f_2 = f_{1s}$) и эффект «вытеснения тока» ослабевает. По окончании процесса пуска, когда частота тока в роторе не превышает 5—7 Гц, ток в стержне практически равномерно распределяется по высоте стержня и двигатель работает как обычный.

На этом же принципе основана работа *двухклеточного* двигателя, у которого в сердечнике ротора расположены две обмотки (клетки): рабочая (в глубине сердечника), обладающая при пуске значительным индуктивным сопротивлением, и пусковая (вблизи воздушного зазора) с повышенным активным сопротивлением (рис. 4.12). При этом рабочая обмотка изготовлена из меди, а пусковая — из латуни (сплав с более высоким удельным электрическим сопротивлением). В табл. 4.1 для сравнения приведены технические данные асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором разной конструкции серии АО2 9-го габарита (синхронная частота вращения 1500 об/мин).

Сравнение приведенных данных показывает, что у двигателя с повышенным скольжением (АОС2-91) КПД и полезная мощность, по сравнению с двигателями двух других типов, наименьшие при наибольшей кратности пускового момента. У двигателя с глубокопазым ротором (АОП2-91) КПД практически такой

же, как и у двигателя обычной конструкции (АО2-91), но кратность пускового момента почти в два раза больше.

Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами имеют более сложную конструкцию, поэтому их стоимость выше, чем двигателей обычной конструкции. Следовательно, применение таких двигателей оправдано лишь в приводах с тяжелыми условиями пуска: большой статический момент нагрузки и значительный момент инерции вращающихся частей.

4.8. Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором

Конструкция асинхронных двигателей с фазным ротором позволяет включать в цепь ротора добавочный резистор с активным сопротивлением $r_{доб}$, что дает возможность воздействовать на пусковые параметры двигателя.

Так, с увеличением активного сопротивления фазной цепи ротора $R'_2 = r'_2 + r_{доб}$ увеличивается критическое скольжение двигателя $s_{кр}$, при этом максимальный момент M_{max} остается неизменным. Это подтверждается механическими характеристиками двигателя (см. рис. 4.5), построенными для ряда нарастающих значений сопротивления добавочного резистора в цепи

обмоток фазного ротора $r_{\text{доб}}$. Увеличение пускового момента введением в цепь ротора добавочного сопротивления $r_{\text{доб}}$ ведет к увеличению сопротивления z_k , а следовательно, способствует уменьшению пускового тока.

В качестве добавочных сопротивлений в цепи ротора применяют пусковые реостаты ПР. Рассмотрим процесс пуска трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором с применением ПР, управляемого контакторами КМ1, КМ2 и КМ3 (рис. 4.13, а). Механические характеристики асинхронного двигателя $n = f(M)$ при работе на разных ступенях ПР представлены на пусковой диаграмме двигателя (рис. 4.14). Сопротивления ступеней реостата и моменты времени их переключения подобраны таким образом, что пусковой момент двигателя меняется от наибольшего значения M_1^* , называемого *начальным пусковым момен-*

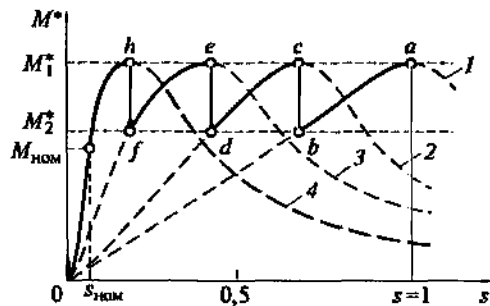


Рис. 4.14. Пусковая диаграмма асинхронного двигателя

том, до значения M_2^* , называемого *моментом переключений*.

При включении двигателя в сеть контакторы КМ1, КМ2, КМ3 отключены и сопротивление реостата на первой ступени максимально:

$$R_{\text{ПР1}} = r_{\text{доб1}} + r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}}.$$

При этом пуск двигателя происходит на реостатной механической характеристике 1 и начальный пусковой момент равен M_1^* (график 1, точка а). Под действием момента M_1^* ротор разгоняется и при некоторой частоте вращения момент достигает значения M_2^* (точка b). При этом срабатывает контактор КМ1 и сопротивление пускового реостата уменьшается до значения $R_{\text{ПР2}} = r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}}$. После этого пуск продолжается на реостатной характеристике 2, а пусковой момент восстанавливается до значения M_1^* . При некоторой частоте вращения (в точке d) срабатывает контактор КМ2 и сопротивление пускового реостата вновь уменьшается до значения $R_{\text{ПР3}} = r_{\text{доб3}}$. Пуск двигателя продолжается на реостатной характеристике 3, при этом пусковой момент восстанавливается. И наконец, при некоторой частоте вращения (точка f) срабатывает контактор КМ3, обмотка ротора замыкается накоротко ($R_{\text{ПР}} = 0$) и дви-

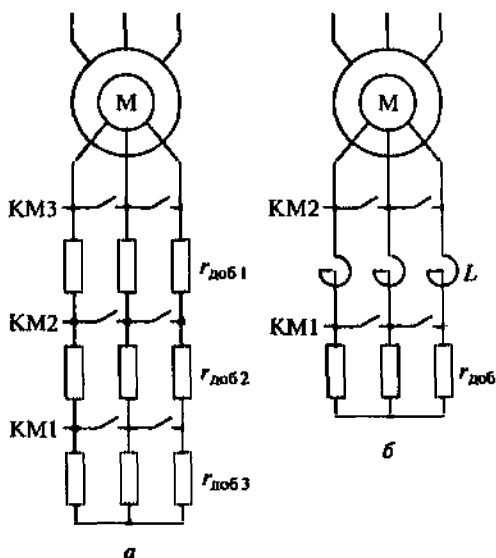


Рис. 4.13. Пусковые реостаты:

а — трехступенчатый; б — двухступенчатый с дросселями

гатель переходит в рабочий режим (естественная механическая характеристика 4), при этом момент и частота вращения достигают установившихся значений, например, $M_{\text{ном}}$ и $s_{\text{ном}}$.

При выборе числа ступеней Z пускового реостата следует иметь в виду, что с увеличением числа ступеней пуск двигателя становится более плавным, но повышается стоимость пусковой аппаратуры и возрастает продолжительность пусковой операции. Для пуска асинхронных двигателей с фазным ротором общего назначения обычно применяют реостаты на число ступеней $Z = 2 - 4$. Если же к электроприводу предъявляются повышенные требования по плавности пуска, то число ступеней увеличивают. При уменьшенном числе ступеней ПР пуск получается форсированным.

При решении задач на расчет сопротивлений резисторов $r_{\text{доб}}$ пусковых реостатов, применяемых в цепях фазного ротора для ограничения пускового тока или регулирования частоты вращения, используют принцип: для данного асинхронного двигателя скольжение s пропорционально активному сопротивлению цепи ротора этого двигателя. В соответствии с этим принципом справедливо равенство

$$\frac{r_2 + r_{\text{доб}}}{s} = \frac{r_2}{s_{\text{ном}}},$$

где r_2 — активное сопротивление собственно обмотки ротора при рабочей температуре; s — скольжение при введенном в цепь ротора резистора сопротивлением $r_{\text{доб}}$ и номинальной нагрузкой на валу двигателя.

Из этого уравнения получим формулу для расчета активного сопротивления добавочного резистора $r_{\text{доб}}$, при включении которого в цепь фазного ротора скольжения двигателя будет

равно требуемому значению s при номинальной нагрузке на валу двигателя:

$$r_{\text{доб}} = r_2 \left(\frac{s}{s_{\text{ном}}} - 1 \right). \quad (4.35)$$

Расчет ступеней пускового реостата при начальном пусковом моменте $M_1^* \leq 0,75$ выполняют аналитическим методом.

Активное сопротивление фазной обмотки ротора определяем по формуле

$$r_2 = \frac{s_{\text{ном}} E_2}{1,73 I_{2\text{ном}}}, \quad (4.36)$$

где E_2 — ЭДС неподвижного ротора при разомкнутой его обмотке, В; $I_{2\text{ном}}$ — ток ротора при номинальной нагрузке, А.

Значения этих параметров приводятся в каталогах на асинхронные двигатели с фазным ротором.

Затем задаются относительным значением момента переключений

$$M_2^* = \frac{M_2}{M_{\text{ном}}},$$

и определяют требуемое отношение начального пускового момента M_1^* к моменту переключений M_2^* по формуле

$$\lambda = (Z+1) \sqrt{\frac{1}{s_{\text{ном}} M_2^*}}, \quad (4.37)$$

где Z — число ступеней пускового реостата.

Сопротивления резисторов на трех ступенях пускового реостата (см. рис. 4.12, а):

$$\begin{aligned} \text{третьей} \quad r_{\text{доб3}} &= r_2 (\lambda - 1); \\ \text{второй} \quad r_{\text{доб2}} &= r_{\text{доб3}} \lambda; \\ \text{первой} \quad r_{\text{доб1}} &= r_{\text{доб2}} \lambda. \end{aligned} \quad (4.38)$$

Сопротивления пускового реостата на его ступенях:

первой $R_{ПР1} = r_{доб1} + r_{доб2} + r_{доб3}$;

второй $R_{ПР2} = r_{доб2} + r_{доб3}$; (4.39)

третьей $R_{ПР3} = r_{доб3}$.

■ **Пример.** Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором, включенный в сеть частотой 50 Гц, имеет номинальные данные: мощность $P_{ном} = 13$ кВт; скольжение $s_{ном} = 5\%$; ЭДС ротора $E_{20} = 205$ В; ток ротора $I_{2ном} = 42$ А; перегрузочная способность $\lambda_m = 2,4$; число полюсов $2p = 6$.

Требуется определить сопротивление резисторов трехступенчатого пускового реостата, если статический момент сопротивления $M_c = 0,7 M_{ном}$, режим пуска нормальный.

Решение. 1. Номинальная частота вращения ротора

$$n_{ном} = n_1(1 - s_{ном}) = 1000(1 - 0,05) = 950 \text{ об/мин.}$$

2. Номинальный момент

$$M_{ном} = 9,55 \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = 9,55 \frac{13000}{950} = 131 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

3. Активное сопротивление фазной обмотки ротора

$$r_2 = \frac{s_{ном} E_{20}}{\sqrt{3} I_{2ном}} = \frac{0,05 \cdot 205}{1,73 \cdot 42} = 0,14 \text{ Ом.}$$

4. Максимальный момент

$$M_{max} = M_{ном} \lambda_m = 131 \cdot 2,4 = 314 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

5. Принимаем относительное значение момента переключений

$$M_2^* = 0,68 M_{ном}.$$

6. Отношение моментов

$$\lambda = (Z+1) \sqrt{\frac{1}{s_{ном} M_2^*}} = (3+1) \sqrt{\frac{1}{0,05 \cdot 0,68}} = 2,33.$$

7. Начальный пусковой момент (относительное значение)

$$M_1^* = M_2^* \lambda = 0,7 \cdot 2,33 = 1,58.$$

8. Сопротивление резисторов на ступенях пускового реостата (см. рис. 4.13, а)

$$r_{доб3} = r_2(\lambda - 1) = 0,14(2,33 - 1) = 0,18 \text{ Ом;}$$

$$r_{доб2} = r_{доб3} \lambda = 0,18 \cdot 2,33 = 0,42 \text{ Ом;}$$

$$r_{доб1} = r_{доб2} \lambda = 0,42 \cdot 2,33 = 0,98 \text{ Ом.}$$

Для пуска асинхронных двигателей с фазным ротором возможно применение пусковых устройств с дросселями (реакторами) L (см. рис. 4.13, б), обеспечивающими плавный пуск двигателя в две ступени. Здесь дроссели выполняют роль автоматических регуляторов силы пускового тока: в начале пуска скольжение $s = 1$ и частота тока в роторе равна частоте тока в сети $f_{2п} = f_1 s = f_1$. При этом сопротивление дросселей максимально

$$x_{Lн} = 2\pi f_1 L \quad (4.40)$$

и они в значительной степени ограничивают начальный пусковой ток. По мере роста частоты вращения ротора (снижения скольжения) частота тока в роторе снижается, а следовательно, уменьшается индуктивное сопротивление дросселей x_L . В итоге увеличивается сила пускового тока. По окончании процесса пуска частота тока в роторе составляет обычно от 2 до 5 Гц, при этом индуктивное сопротивление дросселей $x_L = (0,04 - 0,1) x_{Lн}$. Пуск двигателя происходит в две ступени. На первой ступени пусковой ток ограничивается резисторами $r_{доб}$ и дросселями L , затем срабатывает контактор КМ1, шунтирующий резисторы $r_{доб}$, и наступает вторая ступень пуска. При этом ограничение пускового тока происходит за счет индуктивного сопротивления дросселей, что способствует снижению потерь электропривода во время пуска. Затем срабатывает контактор КМ2, шунтирующий дроссели. Однако следует помнить, что

дрессели по сравнению с резисторами имеют более высокую стоимость, поэтому их применение удорожает электропривод. Если же к плавности пусковой операции привода предъявляются повышенные требования, то применение дросселей в пусковом устройстве оправдано.

4.9. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с фазным ротором

Вопрос о регулировании частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей весьма актуален, так как является одним из основных признаков, по которым асинхронные двигатели могут успешно заменить двигатели постоянного тока, превосходя их по многим технико-экономическим показателям.

Из выражения частоты вращения асинхронного двигателя

$$n_2 = n_1(1-s) = \frac{f_1 60}{p}(1-s) \quad (4.41)$$

следует, что при постоянном статическом моменте M_c на валу двигателя частота вращения ротора n_2 зависит от

частоты переменного тока в питающей сети f_1 , числа пар полюсов в обмотке статора p и скольжения s . Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей возможно изменением любого из перечисленных параметров.

Реостатное регулирование асинхронных двигателей с фазным ротором.

В асинхронных двигателях с фазным ротором частоту вращения регулируют введением в цепь ротора добавочного резистора сопротивлением $r_{доб}$ в виде регулировочного реостата РР (рис. 4.15, а). При полностью выведенном РР ($r_{доб1} = 0$) двигатель работает в режиме *естественной* механической характеристики $n = f(M)$ (рис. 4.15, б, график при $r_{доб1} = 0$). При этом частота вращения максимальна и при номинальной нагрузке $M_c = M_{ном}$ она равна $n_{ном1}$. При увеличении сопротивления реостата возрастает критическое скольжение $s_{кр}$, при этом максимальный момент M_{max} , а следовательно, и перегрузочная способность двигателя остаются неизменными и двигатель переходит в режим *искусственной* механической характеристики (график при $r_{доб2} > 0$), а его частота вращения при заданной нагрузке $M_{ном}$ уменьшается до значения $n_{ном2}$. При

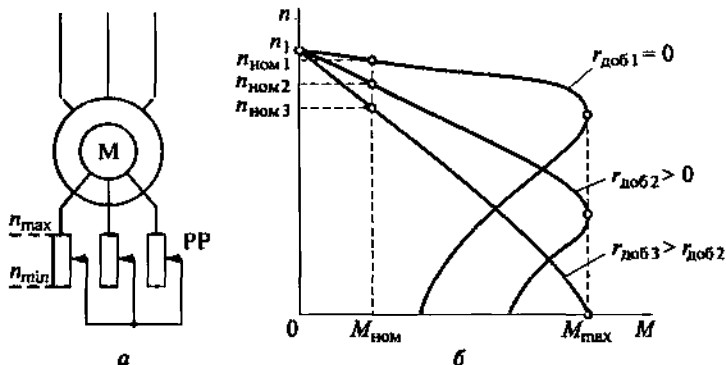


Рис. 4.15. Регулирование частоты вращения электропривода с асинхронным двигателем посредством регулировочного реостата в цепи ротора

дальнейшем увеличении сопротивления регулировочного реостата до значения $r_{\text{доб}3} > r_{\text{доб}2}$ двигатель переходит в режим другой, более мягкой искусственной механической характеристики и частота вращения ротора уменьшается до значения $n_{\text{ном}3}$.

Зависимость скольжения [частоты вращения $n_2 = n_1(1 - s)$] от активного сопротивления цепи ротора ($r_2 + r_{\text{доб}}$) определяется выражением

$$s = \frac{9,55 P_{32}}{M n_1} = \frac{9,55 p m_1 I_2^2 (r_2 + r_{\text{доб}})}{60 f_1 M}. \quad (4.42)$$

Диапазон регулирования получается широким, но изменение частоты вращения возможно только в сторону уменьшения от синхронной. Одновременно со снижением частоты вращения меняется жесткость механических характеристик — они становятся более мягкими. Однако следует помнить, что при увеличении сопротивления регулировочного реостата $r_{\text{доб}}$ растут потери в цепи ротора, при этом КПД и полезная мощность двигателя уменьшаются. С увеличением числа ступеней РР возрастает плавность регулирования, но удорожаются коммутирующие устройства.

4.10. Регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором изменением числа полюсов в обмотке статора

С этой целью изготавливают *много-скоростные* асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. В пазах сердечника статора такого двигателя

располагают две независимые обмотки с разным числом полюсов либо одну полюснопереключаемую обмотку. Эта обмотка имеет конструкцию, которая позволяет методом переключения катушечных групп получать разное число полюсов (число полюсов короткозамкнутой обмотки ротора всегда равно числу полюсов статора). В трехскоростном двигателе на статоре размещают одну обмотку с фиксированным числом полюсов и одну полюснопереключаемую. Если же на статоре расположить две полюснопереключаемые обмотки, то получим четырехскоростной двигатель. Рассмотрим некоторые схемы соединения катушечных групп обмоток статоров.

Схема «звезда/двойная звезда» (Y/Y_Y) дает изменение числа пар полюсов в отношении 2:1 (рис. 4.16, а). Эта схема обеспечивает асинхронному двигателю режим *постоянного момента*, т.е. при переключении обмотки статора с одной схемы на другую вращающий момент остается неизменным ($M \approx \text{const}$), а мощность изменяется обратно пропорционально изменению частоты вращения, т.е. в два раза ($P_{Y/Y_4}/P_{Y_8} \approx 2$). Схемы переключения целесообразно применять в электроприводе с постоянно действующим моментом нагрузки при любой частоте вращения. Механические характеристики асинхронного двигателя для рассмотренного случая представлены на рис. 4.16, а.

Схема «звезда/звезда» (Y/Y) также дает изменение числа пар полюсов в отношении 2:1 (рис. 4.16, б), но она создает в асинхронном двигателе режим *постоянной мощности*, т.е. при переключении обмотки мощность двигателя остается практически неизменной ($P \approx \text{const}$), а момент изменяется в два раза ($M_{Y_8}/M_{Y_4} \approx 2$). Эти схемы

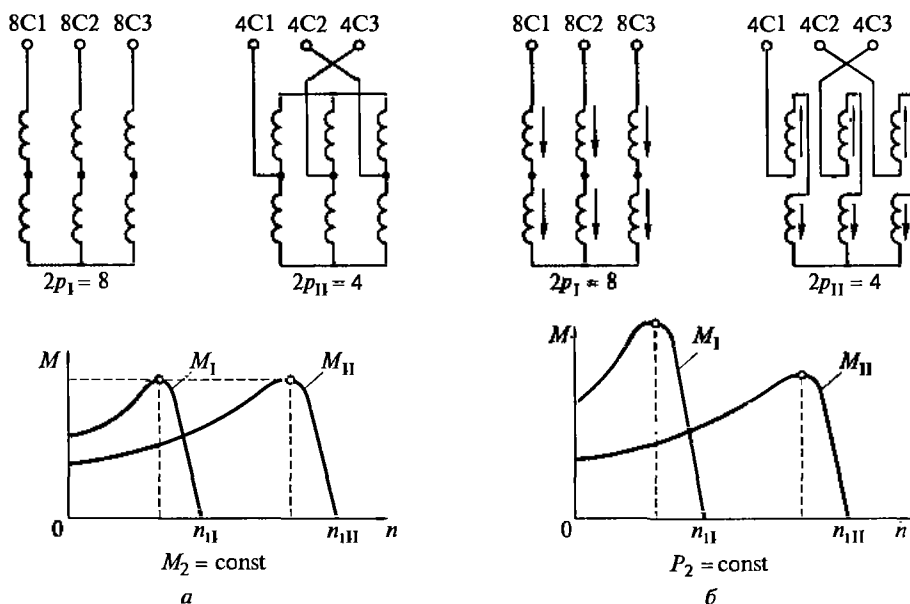


Рис. 4.16. Схемы соединения секционных групп обмотки статора в двухскоростном асинхронном двигателе:

a — Y/Y (режим постоянного момента); *б* — Y/Y (режим постоянной мощности)

переключения следует применять в электроприводе, в котором момент нагрузки меняется обратно пропорционально частоте вращения. Механические характеристики двигателя для рассмотренных схем переключения числа полюсов представлены на рис. 4.16, б. Все эти характеристики являются естественными, в них сохраняется жесткость рабочего участка и обеспечивается двигателю достаточная перегрузочная способность.

Многоскоростные асинхронные двигатели широко применяют в электроприводах, допускающих ступенчатое регулирование частоты вращения (привод лифтов, станков, вентиляторов и т.п.). Достоинством этого способа регулирования является сохранение высоких экономических показателей при переходе с одной частоты вращения на другую, так как на всех ступенях переключения обмотки ста-

тора КПД и коэффициент мощности двигателя остаются почти неизменными. Однако сложность, повышенные габариты и, следовательно, высокая стоимость этих двигателей составляют их недостатки. Кроме того, необходимость переключения обмоток статора на разное число пар полюсов требует усложнения коммутирующей аппаратуры, что также ведет к удорожанию электропривода.

4.11. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей изменением частоты питающего напряжения

В связи с разработкой и широким применением преобразователей частоты ПЧ этот способ регулирования частоты вращения ротора асинхрон-

ных двигателей является наиболее перспективным.

При изменении частоты тока f_1 в цепи обмотки статора меняется синхронная частота вращения поля ($n_1 = f_1 60/p$), а следовательно, и частота вращения ротора n_2 .

Анализируя выражение максимального момента асинхронного двигателя и принимая во внимание, что $m_1 = 3$, а индуктивное сопротивление короткого замыкания двигателя

$$x_k = 2\pi f_1 L_k,$$

получим еще одно *упрощенное* выражение максимального момента асинхронного двигателя

$$M_{\max} \approx \frac{c U_1^2}{f_1^2}, \quad (4.43)$$

где $c = 0,04p/L_k$ — постоянная для данного двигателя величина.

Из этого выражения следует, что с изменением частоты питающего напряжения f_1 меняются максимальный момент двигателя, а следовательно, и его перегрузочная способность $\lambda_m = M_{\max}/M_{\text{ном}}$. Поэтому чтобы сохранить перегрузочную способность двигателя на требуемом уровне, необходимо одновременно с изменением частоты тока f_1 менять напряжение U_1 ,

подводимое к обмотке статора. Характер одновременного изменения f_1 и U_1 зависит от формы графика изменения статического момента нагрузки в конкретном электроприводе. Если статический момент M_c неизменен и частота вращения в электроприводе регулируется при соблюдении условия *постоянства момента*

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n_2} \approx \text{const},$$

то подводимое к двигателю напряжение необходимо изменять пропорционально изменению частоты:

$$U_1 \approx U_{\text{ном}} \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}}, \quad (4.44)$$

где $U_{1\text{ном}}$ и $f_{1\text{ном}}$ — номинальные значения напряжения и частоты тока, подводимого к обмотке статора асинхронного двигателя; U_1 и f_1 — фактически поданные на обмотку статора значения напряжения и частоты тока.

Из выражения (4.44) следует, что $U_1/f_1 = \text{const}$. Форма механических характеристик асинхронного двигателя для этого случая показана на рис. 4.17, а: во всем диапазоне нагрузок характеристики остаются жесткими, а перегрузочная способность сохраняется неизменной. Исключение составляет

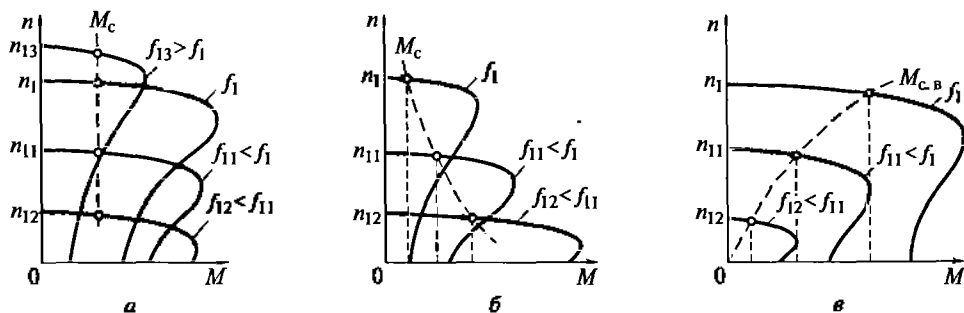


Рис. 4.17. Механические характеристики электропривода с асинхронным двигателем при условиях постоянства момента (а), постоянства мощности (б) и вентиляторной нагрузки (в)

регулирование частоты вращения при увеличении частоты f_1 выше номинальной. Предполагаемое при этом повышение напряжения U_1 сверхноминального значения недопустимо по условиям эксплуатации двигателей. В этих условиях возрастание частоты тока не сопровождается ростом напряжения, так как его оставляют равным номинальному значению. При этом частота вращения увеличивается, а максимальный момент $M_{\max}$, а следовательно, и перегрузочная способность двигателя уменьшаются. Этому режиму на рис. 4.17, а соответствует механическая характеристика при частоте тока $f_{13} > f_1$. Потребляемая двигателем при этом мощность изменяется *пропорционально* изменению частоты вращения двигателя n_2 .

Если же график статического момента нагрузки M_c имеет вид, показанный на рис. 4.17, б, и регулирование частоты вращения двигателя происходит при условии неизменной мощности, то соблюдается условие *постоянства мощности*, т.е.

$$P_2 = 0,105 M_2 n_2 \approx \text{const}, \quad (4.45)$$

и подводимое напряжение следует изменять в соответствии с выражением

$$U_1 \approx U_{1\text{ном}} \sqrt{\frac{f_1}{f_{1\text{ном}}}}, \quad (4.46)$$

т.е.

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}. \quad (4.47)$$

Механические характеристики асинхронного двигателя для условия постоянства мощности представлены на рис. 4.17, б. Электромагнитный момент в этом случае изменяется *обратно пропорционально* частоте вращения:

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n_2}.$$

И наконец, случай *вентиляторного* характера нагрузки, когда напряжение U_1 , подводимое к обмотке статора, необходимо изменять пропорционально квадрату частоты переменного тока,

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}. \quad (4.48)$$

Механические характеристики для частотного регулирования представлены на рис. 4.17, в. В этом случае момент растет пропорционально квадрату частоты вращения.

Применяемые в электроприводах с частотным регулированием *преобразователи частоты* ПЧ позволяют регулировать частоту переменного тока как «вниз», так и «вверх» от номинальной.

Такой преобразователь состоит из управляемого выпрямителя УВ и автономного инвертора АИ. Оба блока обычно выполняют на силовых управляемых диодах — тиристорах, для управления которыми используется система импульсно-фазового управления СИФУ (рис. 4.18). Управляющий сигнал U_y поступает на вход СИФУ из системы автоматического регулирования (САР). Этот сигнал несет информацию о значениях напряжения U_1 и частоты f_1 , которые необходимо подать на обмотку статора, чтобы обеспечить требуемый режим работы двигателя. На выходе СИФУ формируются сигналы U_U и U_f . Сигнал U_U подается на вход управляемого выпрямителя УВ и определяет уровень напряжения постоянного тока U_d , которое подается на вход автономного инвертора АИ, чтобы на выходе ПЧ обеспечить требуемое значение напряжение U_1 . Сигнал U_f поступает на инвертор АИ и

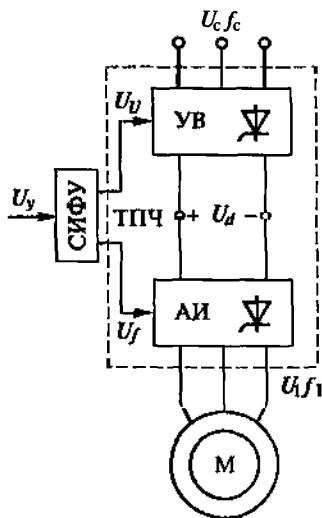


Рис. 4.18. Функциональная схема тиристорного преобразователя частоты

определяет необходимое значение частоты переменного тока f_1 на выходе ПЧ.

Требуемая связь между значениями частоты f_1 и напряжения U_1 на выходе ПЧ регулируется его параметрами в соответствии с требованиями режимов регулирования: режима постоянной мощности либо режима постоянного момента.

Основной недостаток тиристорных преобразователей частоты — несинусоидальность выходного напряжения. В результате помимо основной гармоники с частотой f_1 выходное напряжение ПЧ содержит высшие гармоники. Это является причиной возникновения в двигателе дополнительных потерь, паразитных моментов, противодействующих вращению двигателя, что в конечном итоге ведет к ухудшению эксплуатационных свойств двигателя и вызывает его чрезмерный перегрев. Применение сглаживающих фильтров на выходе ПЧ дает некоторое снижение несинусоидальности

напряжения, но полностью не избавляет от него. Но несмотря на этот недостаток, применение ПЧ для частотного регулирования асинхронных двигателей является прогрессивной мерой, улучшающей технико-экономические свойства регулируемого электропривода переменного тока.

Тиристорные преобразователи частоты обеспечивают плавное изменение частоты вращения асинхронных двигателей как в сторону повышения, так и понижения от номинального значения. Однако при изменении частоты переменного тока в сторону увеличения относительно номинального значения (50 Гц) напряжение, подводимое к обмотке статора, не должно превышать номинального значения, т.е. регулирование частоты вращения двигателя ведется только изменением частоты переменного тока.

Работа асинхронного двигателя при минимальной частоте вращения ограничивается ухудшением условий охлаждения двигателей с самовентиляцией, к которым относится большинство асинхронных двигателей мощностью до 300 кВт. Более эффективной в этом случае является независимая вентиляция двигателя.

4.12. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей изменением подводимого напряжения

При изменении подводимого к обмотке статора напряжения U_1 максимальный момент $M_{\max}$ меняется пропорционально квадрату этого напряжения, а критическое скольжение остается неизменным, так как его значение не зависит от напряжения U_1 . В асинхронных двигателях общего на-

значения диапазон такого регулирования получается весьма узким, так как рабочие участки механических характеристик этих двигателей жесткие (рис. 4.19, а). Несколько лучше этот метод реализуется в асинхронных двигателях с повышенным скольжением (повышенным сопротивлением короткозамкнутой обмотки ротора), у которых рабочие участки механических характеристик менее жесткие (рис. 4.19, б).

Изменять подводимое к двигателю напряжение можно только «вниз» от номинального, так как подводить к двигателю напряжение свыше номинального недопустимо. Таким образом, при понижении напряжения U_1 частота вращения ротора при неизменном нагрузочном моменте уменьшается (скольжение увеличивается). Но при этом возрастают электрические потери в обмотке ротора, величина которых пропорциональна скольжению s :

$$P_{32} = sP_{\text{эм}},$$

где $P_{\text{эм}}$ — электромагнитная мощность двигателя.

Это ведет к значительному снижению КПД двигателя, особенно при низких частотах вращения. Например, при уменьшении частоты вращения в два раза ($s = 0,5$) половина электромагнитной мощности двигателя затрачивается на покрытие электрических потерь в роторе. Если учесть еще и потери в статоре, то КПД двигателя уменьшается более чем в два раза.

Неблагоприятный режим работы асинхронных двигателей при регулировании частоты вращения изменением напряжения U_1 обусловлен тем, что ток I_1 , потребляемый двигателем из сети, пропорционален напряжению U_1 , а электромагнитный момент двигателя пропорционален квадрату этого напряжения. Поэтому по мере снижения напряжения электромагнитный момент двигателя M убывает быстрее, чем уменьшается ток I_1 , потребляемый двигателем из сети, т.е. отношение этих величин (I_1/M) увеличивается. В итоге для получения небольшой частоты вращения требуется значительная величина тока I_1 . Следствием таких неблагоприятных соотношений

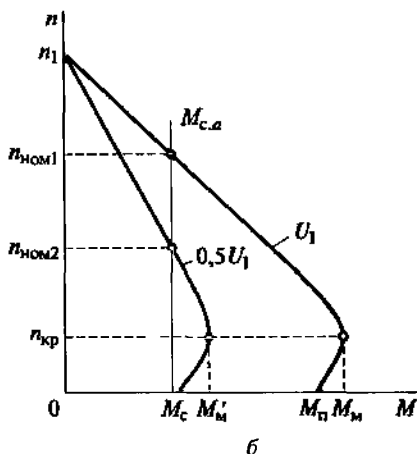
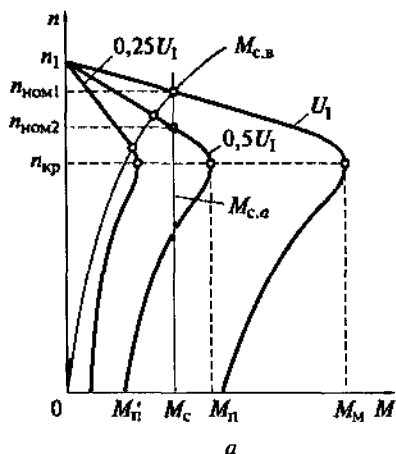


Рис. 4.19. Влияние активного сопротивления обмотки ротора асинхронного двигателя на зависимость частоты вращения от подводимого к обмотке статора напряжения

являются значительные потери в двигателе и его чрезмерный перегрев при регулировании частоты вращения изменением подводимого напряжения U_1 . Исключение составляет электропривод механизмов с *вентиляторной* нагрузкой, у которых статический момент нагрузки $M_{с.в}$ изменяется пропорционально квадрату частоты вращения $M_{с.в} \propto n^2$ (см. рис. 4.17, в). Следовательно, пусковой момент и момент при небольшой частоте вращения двигателя создается сравнительно небольшой силой тока.

Изменять напряжение, подводимое к асинхронному двигателю, можно *регулирующим автотрансформатором* (АТ), включенным в линейные провода между сетью и обмоткой статора (рис. 4.20, а), или *дресселем насыщения* ДН (рис. 4.20, б). Рабочие обмотки дросселя РО создают в линейных проводах питания двигателя индуктивное сопротивление X_L , при этом напряжение непосредственно на входе двигателя равно, В,

$$U_1' = U_{\text{ном}} - jI_1 X_L.$$

Обмотка управления ОУ дросселя подключена к источнику постоянного тока. Величина тока в обмотке управления влияет на индуктивное сопротивление рабочих обмоток. С увеличением тока управления усиливает-

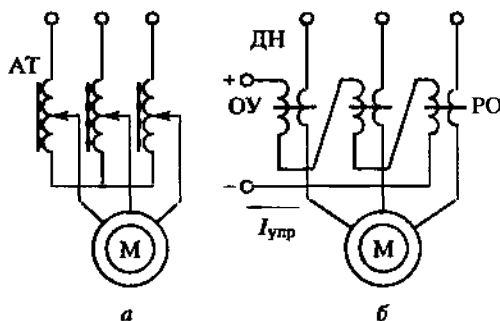


Рис. 4.20. Регулирование частоты вращения электропривода с асинхронным двигателем изменением напряжения питания

ся магнитное насыщение сердечников дросселя и сопротивление X_L рабочих обмоток понижается (напряжение U_1' увеличивается), и наоборот, с уменьшением тока управления сопротивление дросселей возрастает, что ведет к снижению напряжения на двигателе, а следовательно, к уменьшению частоты вращения. Громоздкие дроссели увеличивают габариты и удорожают электропривод, что является причиной, ограничивающей его применение.

Более рациональным является использование *тиристорных регуляторов напряжения* (ТРН). Силовая часть такого регулятора состоит из шести тиристоров (по два в каждой фазе), включенных по встречно-параллельной схеме (рис. 4.21, а), которая обес-

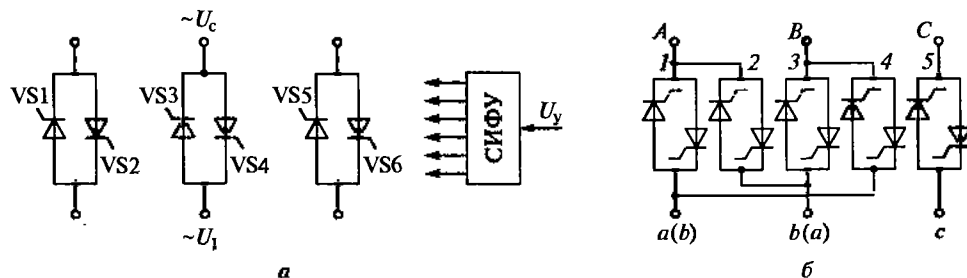


Рис. 4.21. Тиристорные регуляторы напряжения:

а — нереверсивный; б — реверсивный

печивает прохождение тока в течение обоих полупериодов (положительный полупериод тока через один тиристор, а отрицательный — через другой). Управление тиристорами осуществляется системой импульсно-фазового управления (СИФУ) посредством импульсов управления $U_{и.у}$ с требуемым углом управления α в функции сигнала управления U_y , поступающего из системы автоматического регулирования. Если угол управления $\alpha = 0^\circ$, то напряжение на выходе ТРН равно напряжению на входе (падение напряжения на тиристорах практически равно нулю). При $\alpha > 0^\circ$ напряжение U_2 на выходе ТРН уменьшается.

Схема ТРН намного упрощается, если вместо тириستоров применить симисторы, обеспечивающие прохождение тока в обоих направлениях. При этом также упрощается схема СИФУ.

По сравнению с управляемыми тиристорными выпрямителями тиристорные регуляторы напряжения переменного тока намного проще, так как в цепях переменного тока не требуется применения элементов для запираания тиристоров в конце каждого полупериода, так как тиристор при прохождении напряжения через нулевые значения запирается естественным путем.

Для создания реверсивного ТРН, осуществляющего реверсирование трехфазного двигателя, необходимо пять пар тиристоров (рис. 4.21, б) или пять симисторов.

Управление таким ТРН осуществляется импульсами СИФУ, схема которого усложняется возросшим количеством каналов управления. Для вращения двигателя в одну сторону управляющие импульсы подаются на открывание первой, третьей и пятой пар тиристоров. При этом к обмотке статора двигателя будет приложено

напряжение U_2 в последовательности a, b и c (см. рис. 4.21, б). Для реверсирования двигателя нужно подать импульсы на вторую, четвертую и пятую пары тиристоров. При этом напряжение на выходе ТРН (на входе двигателя) будет иметь последовательность b, a и c .

Основной недостаток ТРН — несинусоидальность напряжения U_2 на выходе, которое кроме основной синусоидальной составляющей содержит высшие гармоники.

Тиристорный регулятор напряжения используют также при пуске асинхронного двигателя, обеспечивая «мягкий» пуск, исключающий значительные броски пускового тока.

4.13. Импульсное регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

Импульсное регулирование частоты вращения асинхронных двигателей осуществляется путем периодического включения двигателя в сеть и отключения его от сети или периодического шунтирования резисторов, включенных в цепь статора или ротора (для двигателей с фазным ротором). При этом двигатель постоянно находится в переходном режиме ускорения и замедления частоты вращения ротора.

В простейшем случае импульсное регулирование можно реализовать посредством контактора КМ (рис. 4.22, а), на обмотку которого подаются управляющие импульсы постоянного напряжения U_k продолжительностью t_p , чередующиеся с паузами продолжительностью t_n . Если принять, что время срабатывания и время отпускания контактора равны нулю, то график изме-

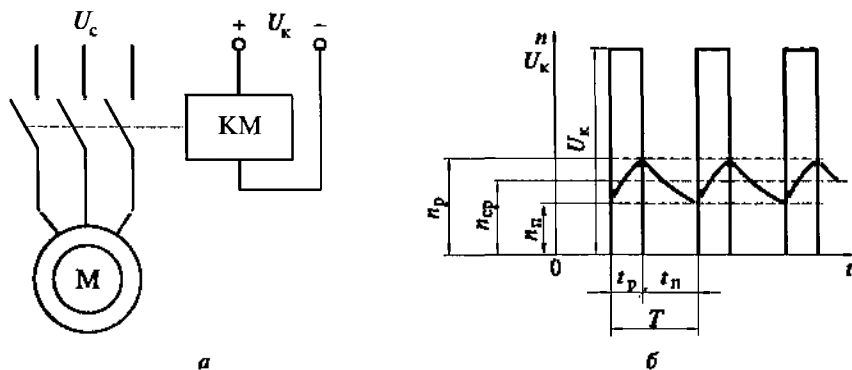


Рис. 4.22. Импульсное регулирование электропривода с асинхронным двигателем

нения частоты вращения ротора двигателя можно совместить с графиком чередования управляющих импульсов. За время t_p частота вращения нарастает до n_p , а за время паузы она убывает до значения n_n (рис. 4.22, б). В итоге ротор вращается с некоторой средней частотой вращения:

$$n_{\text{ср}} = \frac{n_p + n_n}{2}. \quad (4.49)$$

Средняя частота вращения ротора зависит от коэффициента управления $\gamma = t_p/T$: чем больше γ , тем больше частота вращения $n_{\text{ср}}$. Здесь $T = t_p + t_n$ называется *периодом импульса*.

Диапазон колебаний частоты вращения при импульсном регулировании за время одного периода T составляет от n_p до n_n и эти колебания тем *меньше*, чем больше момент инерции вращающихся частей двигателя и чем больше частота следования импульсов.

Импульсное регулирование с применением контактора КМ не обеспечивает достаточной надежности из-за быстрого выхода из строя контактов, коммутирующих силовую цепь двигателя. Более надежным является применение бесконтактных устройств, например тиристорного ключа. По энергетическим показателям импуль-

сное регулирование частоты вращения эквивалентно регулированию частоты вращения изменением подводимого к обмотке статора напряжения.

4.14. Асинхронные двигатели в тормозных режимах

Генераторное (рекуперативное) торможение. Условием перехода асинхронного двигателя в генераторный режим является превышение частоты вращения ротора относительно синхронной частоты вращения магнитного поля статора ($n_2 > n_1$). В этих условиях электромагнитный момент двигателя становится отрицательным, а вырабатываемая электроэнергия отдается в сеть, т.е. наступает режим генераторного рекуперативного торможения. Практически этот режим можно получить, уменьшив синхронную частоту вращения n_1 в работающем двигателе, переключив обмотку статора этого двигателя на большее число полюсов. В этих условиях ротор, вращаясь по инерции с прежней частотой вращения n_2 , будет обгонять вращающееся поле статора, т.е. двигатель перейдет в генераторный режим. При этом электромагнитный момент дви-

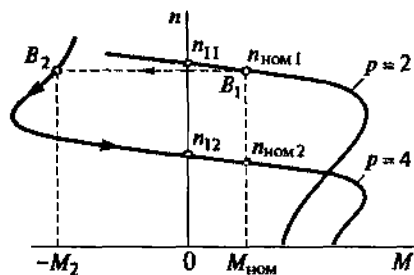


Рис. 4.23. Режим генераторного торможения асинхронного двигателя

гателя станет тормозящим, вырабатываемая электроэнергия будет поступать в сеть.

Для пояснения обратимся к рис. 4.23, где показаны две механические характеристики двухскоростного асинхронного двигателя. Например, одна характеристика при $p = 2$ (при частоте $f_1 = 50$ Гц этому соответствует $n_1 = 1500$ об/мин), а другая — $p = 4$ (что соответствует $n_1 = 750$ об/мин). Допустим, двигатель работал при $p = 2$ в режиме номинальной нагрузки (точка B_1) и его ротор вращался с частотой $n_{ном1}$. Для генераторного торможения двигателя его обмотку статора переключили на число полюсов $p = 4$ (не отключая двигатель от сети). В начальный момент под действием сил инерции ротор двигателя продолжает вращение с прежней частотой и режим работы двигателя перейдет в точку B_2 на механической характеристике, соответствующей $p = 4$, при этом отрицательный момент двигателя станет тормозящим. Под действием этого момента частота вращения уменьшится до значения $n_{ном2} < n_{ном1}$.

Генераторный режим торможения часто используют для «подтормаживания», т.е. для уменьшения скорости перед полной остановкой механизма. Делают это для того, чтобы избежать механических ударов и толчков, не-

избежных при резком торможении. Например, «подтормаживание» применяют в лифтах и других подъемных механизмах.

Синхронную частоту вращения n_1 можно также снижать путем уменьшения частоты переменного тока f_1 . Это возможно при питании асинхронного двигателя от управляемого преобразователя частоты ПЧ. Постепенно снижая частоту тока f_1 , можно уменьшить частоту вращения почти до полной остановки привода.

Генераторное рекуперативное торможение возможно также в подъемном устройстве с активным статическим моментом. При работе в режиме спуска под действием массы опускаемого груза частота вращения ротора, увеличиваясь, достигает значения, превышающего синхронную частоту вращения, и асинхронный двигатель переходит в генераторный режим. Вырабатываемая при этом электроэнергия поступает в сеть.

Динамическое торможение. В асинхронном двигателе динамическое торможение наступает при отключении двигателя от сети переменного тока и подключении его к источнику постоянного тока. Так, если асинхронный двигатель был включен в трехфазную сеть (рис. 4.24, а) посредством переключателя SA, то для его динамического торможения следует этот переключатель перевести из положения 1 в положение 2. При этом постоянный ток, проходящий по обмотке статора, создаст магнитное поле статора, постоянное по величине и неподвижное в пространстве. В этих условиях в обмотке ротора, который продолжает вращение за счет кинетической энергии вращающихся частей электропривода, будет индуцироваться переменная ЭДС E_2 . Следовательно, асинхрон-

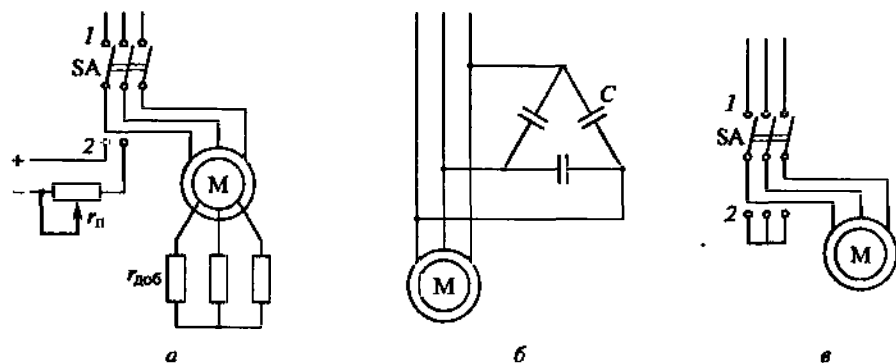


Рис. 4.24. Схемы включения асинхронных двигателей при динамическом торможении

ный двигатель в режиме динамического торможения работает как синхронный генератор. Так как обмотка ротора замкнута, то ЭДС E_2 наведет в обмотке ротора ток I_2 , который, взаимодействуя с полем статора, создаст на роторе электромагнитный момент, направленный против вращения ротора, т. е. *тормозящий момент*. В процессе динамического торможения механическая энергия вращающихся по инерции частей электропривода преобразуется в электрическую энергию, которая расходуется на нагрев обмотки ротора и резисторов $r_{доб}$, включенных в цепь ротора.

При остановившемся роторе момент динамического торможения равен нулю. В двигателях с фазным ротором для повышения эффективности процесса торможения в цепь ротора вводят резистор $r_{доб}$ переменного сопротивления. В начале торможения следует установить наибольшее значение сопротивления $r_{доб}$, а затем постепенно уменьшать его. При этом максимум момента торможения будет смещаться в сторону меньшей частоты вращения.

При динамическом торможении двигателя с короткозамкнутым ротором эффективность торможения повы-

шают увеличением напряжения постоянного тока U_n , подводимого к обмотке статора. Из-за явления магнитного насыщения магнитопровода двигателя эффективность динамического торможения при увеличении напряжения постоянного тока оказывается недостаточной.

Следует помнить, что постоянный ток испытывает лишь активное сопротивление обмотки статора, поэтому напряжение постоянного тока, подводимое к обмотке статора при динамическом торможении, должно быть ниже напряжения переменного тока, соответствующего рабочему режиму двигателя, чтобы ток в обмотке статора не превысил номинального значения.

Разновидностью динамического торможения является **конденсаторное торможение**, основанное на явлении самовозбуждения. При отключении двигателя первоначальное самовозбуждение происходит за счет остаточного магнетизма магнитной системы. Благодаря наличию батареи конденсаторов C (рис. 4.24, б) происходит обмен реактивной энергией между магнитным полем двигателя и электрическим полем конденсаторов. В результате по обмотке статора проходит ток I_1 , в

магнитопроводе двигателя возникает магнитный поток, который индуцирует в обмотке вращающегося по инерции ротора ЭДС E_2 . Ток ротора I_2 взаимодействует с полем статора и создает тормозящий момент.

Принцип самовозбуждения для торможения асинхронных двигателей может быть реализован и без применения конденсаторов. Для этого необходимо после отключения двигателя от сети замкнуть его обмотку статора: переключатель SA быстро перевести из положения 1 в положение 2 (рис. 4.24, в). При этом за счет магнитного потока остаточного магнетизма произойдет самовозбуждение двигателя и на роторе возникнет тормозящий момент. Хотя процесс этот весьма кратковремен, но все же эффективен и в некоторых случаях может оказаться достаточным. Однако основным способом динамического торможения все же является торможение постоянным током.

Торможение противовключением.

Такое торможение позволяет получать большие тормозные моменты, поэтому его применяют при необходимости быстрой остановки электропривода. Для создания этого режима торможения достаточно у работающего асинхронного двигателя изменить направление вращения поля статора путем переключения двух проводов, присоединяющих к сети обмотку статора. Например, прямой (рабочий) порядок следования фаз ABC заменить обратным порядком следования фаз BAC (см. 3.1).

На рис. 4.25, а показаны механические характеристики двигателя для прямого и обратного порядков следования фаз. Допустим, двигатель работает в основном (двигательном) режиме рабочей точки A . При торможении противовключением изменяют порядок следования фаз на обмотке статора, при этом рабочая точка сместится на характеристику обратного

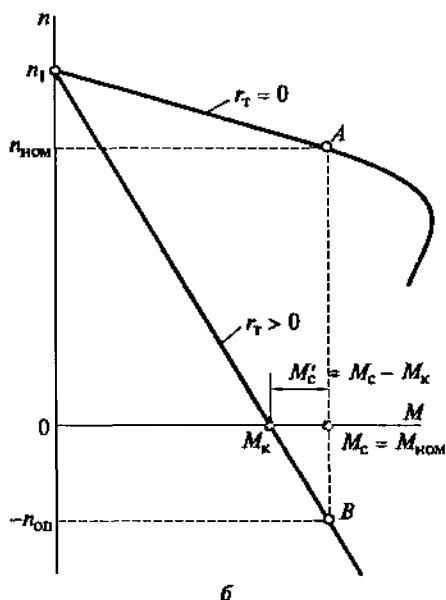
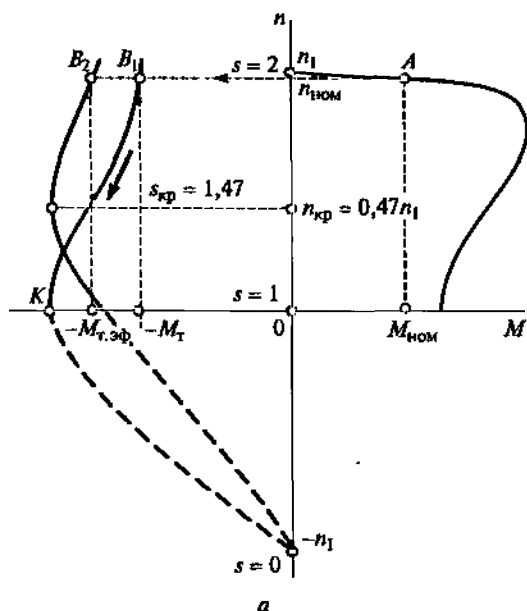


Рис. 4.25. Торможение противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором

следования фаз и займет положение в точке B_1 . В результате на ротор двигателя будет действовать начальный тормозной момент — M_t и частота вращения ротора n_2 будет снижаться до нуля. При $n_2 = 0$ (точка K) двигатель необходимо отключить от сети, иначе произойдет реверс, т. е. двигатель после остановки ротора перейдет из тормозного в основной (двигательный) режим с противоположным направлением вращения ротора.

В асинхронных двигателях с фазным ротором момент и ток торможения противовключением можно регулировать введением в цепь ротора реостата r_t . При изменении сопротивления этого реостата меняется жесткость механических характеристик в режиме торможения.

Искусственная механическая характеристика двигателя в режиме торможения противовключением располагается во втором и третьем квадрантах осей координат в диапазоне частот вращения от n_1 до $-n_1$, что соответствует изменению скольжения от 2 до 0 (см. рис. 4.25, *a*). В конце торможения, когда частота вращения $n = 0$ (точка K), скольжение $s = 1$.

Изменяя сопротивление резистора r_t , включаемого в сеть фазного ротора, можно получить несколько искусственных механических характеристик, отличающихся критическим скольжением $s_{кр}$. Наиболее эффективным получается торможение противовключением на искусственной механической характеристике торможения с критическим скольжением $s_{кр} = 1,47$, так как в этом случае среднее значение момента торможения M_t в диапазоне частоты вращения при торможении от $n_{ном}$ до $n = 0$ получается наибольшим. Начальный тормозной момент в этом случае называют эффективным ($M_{т.эф}$).

Сопротивление резистора $r_{т.эф}$, соответствующего эффективному торможению противовключением методом переключения фаз подводимого напряжения, определяют по формуле

$$r_{т.эф} = \frac{1,47}{k_e^2} \sqrt{r_1^2 + x_k^2} - r_2, \quad (4.50)$$

где k_e — коэффициент трансформации между обмотками статора и ротора асинхронного двигателя с фазным ротором:

$$k_e \approx 0,95 \frac{U_{1л}}{E_2}.$$

Начальный тормозной момент на этой характеристике при торможении двигателя, работающего на естественной механической характеристике, равен $M_{т.эф} = 0,8 M_{max}$.

В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором регулировка параметров режима торможения противовключением исключена.

Торможение противовключением возможно в подъемном устройстве с активным статическим моментом сопротивления M_c . Допустим асинхронный двигатель с фазным ротором привода лебедки (см. рис. 1.5) работал на подъем груза G в режиме точки номинальной нагрузки A на естественной механической характеристике ($r_t = 0$). Если в цепь ротора этого двигателя включить резистор сопротивлением $r_t > 0$, то искусственная механическая характеристика примет вид, показанный на рис. 4.25, *б*.

В этих условиях статический момент сопротивления, создаваемый грузом G , превысит наибольшее значение вращающего момента двигателя M_k и под действием избыточного статического момента $M'_c = M_c - M_k$ начнется опускание груза со скоростью, соответствующей частоте вращения вала

двигателя — $n_{оп}$. Изменением значения сопротивления r_T в цепи фазного ротора можно регулировать скорость опускания груза: чем больше r_T , тем мягче механическая характеристика и тем быстрее опускается груз.

4.15. Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели

4.15.1. Принцип работы однофазного асинхронного двигателя

Однофазные асинхронные двигатели — это обычные двигатели небольшой мощности, широко применяемые для привода механизмов и различных бытовых приборов. По конструкции они почти не отличаются от трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Различие состоит в том, что на сердечнике статора однофазного двигателя уложена однофазная обмотка, занимающая 2/3 пазов сердечника.

При включении однофазной обмотки статора С1—С2 в сеть (рис. 4.26, а)

переменный ток, проходя по обмотке, создает пульсирующий магнитный поток, неподвижный в пространстве, но изменяющийся от $+\Phi_{max}$ до $-\Phi_{max}$. Воспользуемся графическим методом разложения пульсирующего магнитного потока на два одинаковых, равных $\Phi_{max}/2$, магнитных потока $\Phi_{пр}$ и $\Phi_{обр}$, вращающихся в разные стороны с одинаковой частотой (рис. 4.26, б), об/мин:

$$n_{пр} = n_{обр} = f_1 \frac{60}{p} = n_1.$$

Считаем поток $\Phi_{пр}$, вращающийся в направлении вращения ротора, прямым, а поток $\Phi_{обр}$ — обратным. Допустим, что ротор двигателя вращается против часовой стрелки, т.е. в направлении потока $\Phi_{пр}$. Частота вращения ротора n_2 меньше частоты вращения магнитного потока n_1 , поэтому скольжение ротора относительно потока $\Phi_{пр}$

$$s_{пр} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = s. \quad (4.51)$$

Магнитный поток $\Phi_{обр}$ вращается встречно ротору, поэтому частота вра-

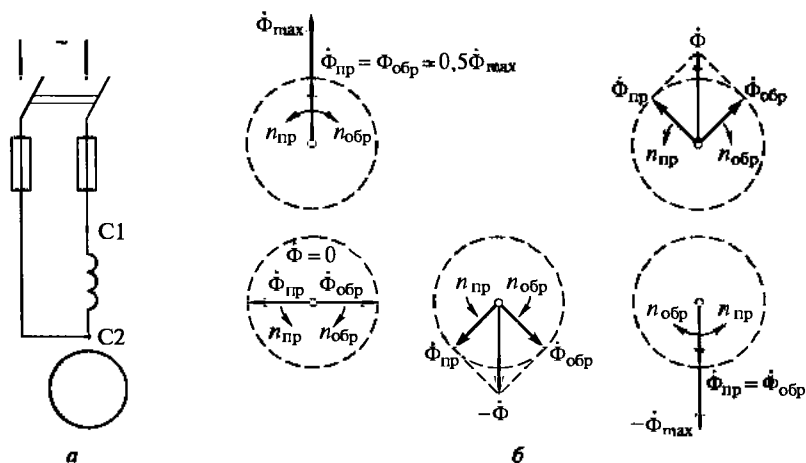


Рис. 4.26. Схема однофазного двигателя (а) и разложение пульсирующего магнитного потока на два вращающихся (б)

шения ротора n_2 относительно этого потока отрицательна, а скольжение ротора относительно магнитного потока $\Phi_{обр}$

$$s_{обр} = 2 - s_{пр}. \quad (4.52)$$

Прямой $\Phi_{пр}$ и обратный $\Phi_{обр}$ магнитные потоки наводят в обмотке ротора ЭДС $E_{2пр}$ и $E_{2обр}$, которые создают в короткозамкнутом роторе соответственно токи $I_{2пр}$ и $I_{2обр}$. Частота тока в роторе пропорциональна скольжению, следовательно,

$$f_{2пр} = f_1 s_{пр}; \quad f_{2обр} = f_1 (2 - s_{пр}).$$

Таким образом, ток $I_{2обр}$, наводимый обратным магнитным потоком в обмотке ротора, имеет частоту $f_{2обр}$, намного превышающую частоту $f_{2пр}$ тока ротора $I_{2пр}$, наведенного прямым потоком. Например, для однофазного асинхронного двигателя, работающего от сети с частотой $f_1 = 50$ Гц при $n_1 = 1500$ и $n_2 = 1440$ об/мин, скольжение $s_{пр} = 0,04$ и частота тока $f_{2пр} = 50 \cdot 0,04 = 2$ Гц, а $s_{обр} = 2 - s_{пр} = 2 - 0,04 = 1,96$.

Следовательно, частота тока от обратного магнитного потока

$$f_{2обр} = f_1 s_{обр} = 50 \cdot 1,96 = 98 \text{ Гц}.$$

В результате взаимодействия тока $I_{2пр}$ с магнитным потоком $\Phi_{пр}$ возникает электромагнитный момент

$$M_{пр} = c_m \Phi_{пр} I_{2пр} \cos \varphi_{2пр}, \quad (4.53)$$

где c_m — постоянный коэффициент, определяемый конструкцией двигателя.

Ток $I_{2обр}$, взаимодействуя с магнитным потоком $\Phi_{обр}$, создает электромагнитный момент $M_{обр}$, направленный встречно $M_{пр}$, т.е. против вращения ротора:

$$M_{обр} = c_m \Phi_{обр} I_{2обр} \cos \varphi_{2обр}. \quad (4.54)$$

Результирующий электромагнитный момент, действующий на ротор однофазного асинхронного двигателя,

$$M = M_{пр} - M_{обр}.$$

При небольших значениях скольжения $s_{пр}$, т.е. при работе двигателя в пределах номинальной нагрузки, электромагнитный момент создается в основном за счет $M_{пр}$. Тормозящее действие момента обратного поля $M_{обр}$ незначительно. Объясняется это тем, что $f_{2обр} \gg f_{2пр}$, следовательно, индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора току $I_{2обр}$ намного больше его активного сопротивления. Поэтому ток $I_{2обр}$, имеющий большую индуктивную составляющую, оказывает сильное размагничивающее действие на обратный магнитный поток $\Phi_{обр}$, значительно ослабляя его. Поэтому в режиме нагрузки двигателя момент $M_{обр}$ не оказывает значительного тормозящего действия на ротор однофазного двигателя.

На рис. 4.27 показаны графики зависимостей электромагнитных моментов от скольжения для однофазного двигателя. График результирующего момента $M = f(s_{пр})$ получен вычитанием ординат моментов $M_{пр}$ и $M_{обр}$. При неподвижном роторе ($n_2 = 0$) скольжение $s_{пр} = s_{обр} = 1$ и $M_{пр} = M_{обр}$,

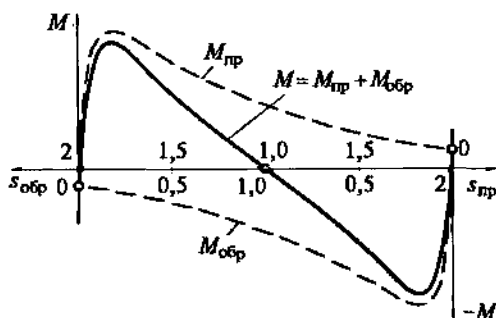


Рис. 4.27. Механические характеристики однофазного асинхронного двигателя

поэтому начальный пусковой момент однофазного асинхронного двигателя $M_{\pi} = 0$. Для создания пускового момента необходимо привести ротор во вращение в ту или иную сторону. Тогда скольжение s отличается от нуля, равенство моментов $M_{\text{пр}}$ и $M_{\text{обр}}$ нарушается и результирующий электромагнитный момент приобретает некоторое значение

$$M = (M_{\text{пр}} - M_{\text{обр}}) > 0.$$

Для получения **пускового момента** в однофазном асинхронном двигателе необходимо, чтобы обмотка статора создавала вращающееся магнитное поле, которое можно получить, если на статоре двигателя помимо основной (рабочей) обмотки A , занимающей $2/3$ пазов сердечника, в оставшихся $1/3$ пазов расположить вспомогательную (пусковую) обмотку B . При этом оси обмоток должны быть смещены в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град (рис. 4.28, a), а токи I_A и I_B в обмотках должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга. Так как обе обмотки включены в однофазную сеть параллельно, то для получения фазового сдвига между указанными токами в цепь вспомогательной (пусковой) обмотки B включают фазосмещающий элемент ФЭ, в ка-

честве которого используют активное сопротивление (резистор), индуктивность (дроссель) или емкость (конденсатор). После того как ротор двигателя разгонится до частоты вращения, близкой к установившейся, пусковую обмотку B отключают. Таким образом, во время пуска двигатель работает как двухфазный, а по окончании пуска — как однофазный.

Для получения *кругового* вращающегося магнитного поля с использованием двух обмоток на статоре, оси которых смещены в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град, необходимо, чтобы МДС обмоток были равны ($F_A = F_B$), а токи в обмотках сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол $\varphi = 90^\circ$. Круговое поле характеризуется тем, что пространственный вектор Φ магнитного потока этого поля вращается равномерно ($n = \text{const}$) и его значение в любой момент времени постоянно: $\Phi = \text{const}$ (рис. 4.28, b). Такое поле обеспечивает получение наибольшего пускового момента M_{π} , так как оно не содержит обратной составляющей.

При частичном нарушении какого-либо условия, например $F_A \neq F_B$, или когда токи в обмотках сдвинуты по фазе на угол, отличающийся от 90 эл. град, обмотки статора создают вращающееся-

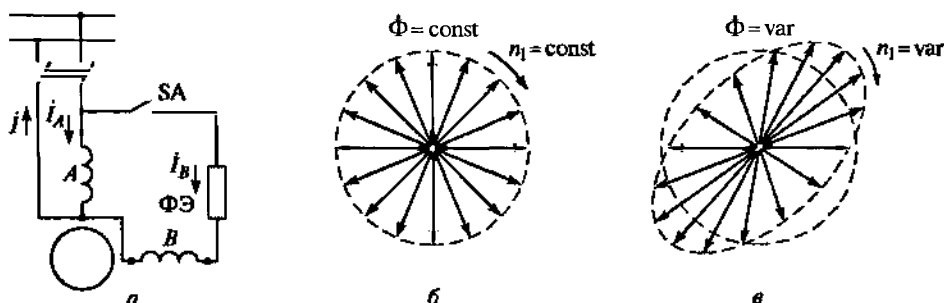


Рис. 4.28. Схема однофазного двигателя с пусковой обмоткой (a) и диаграммы кругового (b) и эллиптического ($в$) вращающихся полей

ся эллиптическое поле (рис. 4.28, в). Пространственный вектор магнитного потока этого поля вращается неравномерно ($n_1 = \text{var}$) и в разных пространственных положениях он неодинаков ($\dot{\Phi} = \text{var}$). Эллиптическое вращающееся поле состоит из двух не равных по величине вращающихся в разные стороны круговых полей: прямого (большого) и обратного (меньшего). Обратное вращающееся поле создает тормозной момент и ухудшает свойства однофазного двигателя.

Из векторных диаграмм, приведенных на рис. 4.29, а, б, видно, что включение в цепь обмотки В резистора с активным сопротивлением r или дросселя индуктивностью L не обеспечивает фазового сдвига между токами $\dot{I}_A$ и $\dot{I}_B$ на 90° . Лишь включение конденсатора емкостью C в качестве ФЭ обеспечивает фазовый сдвиг между токами $\dot{I}_A$ и $\dot{I}_B$ на угол 90° (рис. 4.29, в). При этом емкость конденсатора выбирают такой, чтобы ток $\dot{I}_B$ в момент пуска двигателя ($s = 1$) опережал по фазе напряжение сети $\dot{U}_1$ на угол φ_B , дополняющий угол φ_A до 90° : $\psi = \varphi_A + \varphi_B = 90^\circ$. Если при этом обе обмотки создают одинаковые МДС, то вращающееся поле статора будет круговым.

Таким образом, только использование конденсатора в качестве ФЭ обеспечивает однофазному асинхрон-

ному двигателю наилучшие пусковые свойства. Однако применение конденсаторов не всегда оправдано из-за их больших габаритных размеров. Например, для однофазного асинхронного двигателя мощностью 40 Вт, включаемого в сеть напряжением 220 В, частотой 50 Гц, необходим пусковой конденсатор емкостью 20 мкФ при рабочем напряжении 400 В. Габаритные размеры такого конденсатора довольно значительны, занимаемый им объем составляет примерно половину объема двигателя. Когда условия работы двигателя не требуют большого пускового момента, то используют однофазные асинхронные двигатели с активным сопротивлением в качестве ФЭ. При этом не требуется включения дополнительного резистора, так как активное сопротивление пусковой обмотки повышается за счет выполнения ее из обмоточного провода уменьшенного поперечного сечения по сравнению с проводом рабочей обмотки. Пусковая обмотка такого двигателя включена лишь на время пуска, которое не превышает нескольких секунд, поэтому уменьшенное сечение провода этой обмотки вполне допустимо. Пусковой момент таких двигателей не превышает номинального, но этого достаточно для большинства случаев применения однофазных асинх-

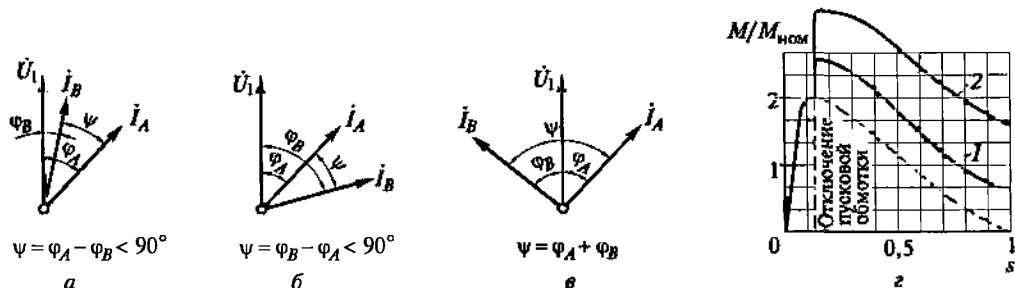


Рис. 4.29. Сравнение свойств фазосмещающих элементов

ронных двигателей, включаемых в сеть при небольшой нагрузке на валу.

При использовании в качестве фазосмещающего элемента ФЭ конденсатора пусковой момент однофазного двигателя при правильно подобранной емкости C может составить $M_{\text{п}} = (1,6 - 2,0) M_{\text{ном}}$. Механические характеристики однофазных асинхронных двигателей приведены на рис. 4.29, г: характеристика 1 — при использовании активного сопротивления в качестве ФЭ, характеристика 2 — при использовании для этого емкости (конденсатора), пунктирной линией изображена характеристика двигателя при отсутствии ФЭ в пусковой обмотке.

Мощность однофазного двигателя составляет приблизительно 40—45 % от мощности трехфазного двигателя при одинаковых габаритах.

4.15.2. Конденсаторные асинхронные двигатели

Конденсаторный асинхронный двигатель — это двухфазный двигатель, на статоре которого расположены две фазные обмотки, занимающие одинаковое число пазов. Оси этих обмоток смещены в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град. Питание двигателя осуществляется от однофазной сети, при этом обмотка фазы A включается в сеть непосредственно, а обмотка фазы B — через рабочий конденсатор $C_{\text{раб}}$ (рис. 4.30, а). В процессе работы конденсаторного двигателя обе обмотки включены постоянно. Таким образом, если однофазный асинхронный двигатель по окончании процесса пуска работает с пульсирующим магнитным полем, то конденсаторный двигатель — с вращающимся полем.

Для схемы включения конденсаторного асинхронного двигателя, показанной на рис. 4.29, а, при заданном напряжении сети U_1 емкость рабочего конденсатора, необходимая для получения кругового вращающегося поля, Φ ,

$$C_{\text{раб}} = \frac{I_A \cos \varphi_A}{U_1 f_1 k}, \quad (4.55)$$

где φ_A — угол фазового сдвига между током I_A и напряжением U_1 при круговом вращающемся поле; k — коэффициент, определяемый отношением эффективных чисел витков в обмотках фаз статора B и A :

$$k = \frac{w_B k_{\text{воб}}}{w_A k_{\text{Аоб}}}, \quad (4.56)$$

$k_{\text{воб}}$ и $k_{\text{Аоб}}$ — обмоточные коэффициенты фазных обмоток статора B и A .

Емкость $C_{\text{раб}}$ обеспечивает получение в двигателе кругового вращающегося поля только при коэффициенте $k = \tan \varphi_A$. Анализ рабочего процесса конденсаторного двигателя показывает, что при заданном коэффициенте k круговое поле можно получить только для расчетного режима работы двигателя. При отклонении от этого режима меняются значения I_A и φ_A , вращающееся магнитное поле становится эллиптическим и рабочие свойства двигателя ухудшаются. Обычно конденсаторные асинхронные двигатели рассчитывают так, чтобы круговое вращающееся поле соответствовало номинальной или близкой к ней нагрузке. Значение рабочей емкости $C_{\text{раб}}$ обратно пропорционально напряжению сети U_1 , т. е. чем выше напряжение сети, тем меньше требуемая емкость $C_{\text{раб}}$.

При выборе типа конденсатора $C_{\text{раб}}$ следует иметь в виду, что его рабочее напряжение определяется амплитуд-

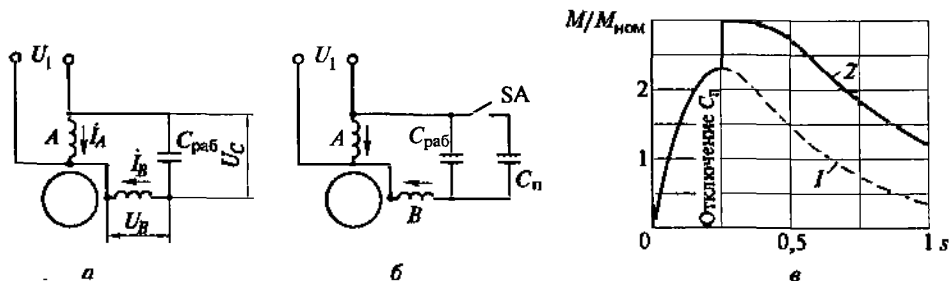


Рис. 4.30. Асинхронный конденсаторный двигатель:

a — с рабочим конденсатором; *б* — с рабочим и пусковым конденсаторами; *в* — механические характеристики: 1 — при рабочем конденсаторе; 2 — при рабочем и пусковом конденсаторах

ным значением синусоидального напряжения U_C , приложенного к конденсатору (см. рис. 4.30, *a*), при круговом вращающемся поле это напряжение превышает напряжение сети U_1 :

$$U_C = U_1 \sqrt{1 + k^2}. \quad (4.57)$$

Конденсаторные асинхронные двигатели имеют сравнительно высокий КПД и коэффициент мощности ($\cos \varphi_1 = 0,80—0,95$). Однако пусковые свойства этих двигателей неудовлетворительны, так как при пуске магнитное поле двигателя — эллиптическое и содержит значительную обратную составляющую. В итоге конденсаторный двигатель с рабочим конденсатором $C_{\text{раб}}$ создает пусковой момент $M_{\text{п}} = (0,3—0,5)M_{\text{ном}}$. Для повышения пускового момента параллельно рабочему конденсатору $C_{\text{раб}}$ включают пусковой конденсатор $C_{\text{п}}$ (рис. 4.30, *б*). Емкость пускового конденсатора в несколько раз больше, чем рабочего. Например, для создания пускового момента, равного номинальному, требуется пусковой конденсатор емкостью $C_{\text{п}} = (2,0—2,5)C_{\text{раб}}$. Для получения еще большего значения пускового момента пусковую емкость можно увеличить до $C_{\text{п}} = (5—7)C_{\text{раб}}$.

На рис. 4.30, *в* показаны механические характеристики конденсаторного

двигателя с рабочим конденсатором $C_{\text{раб}}$ (характеристика 1) и с рабочим и пусковым конденсаторами ($C_{\text{раб}} + C_{\text{п}}$) (характеристика 2).

Пусковой конденсатор включается лишь на время пуска. После разгона двигателя $C_{\text{п}}$ следует отключить, так как при небольших значениях скольжения в цепи обмотки *B* со значительной емкостью ($C_{\text{раб}} + C_{\text{п}}$) и индуктивностью L возможен *резонанс напряжений* или состояние, близкое к резонансу. В результате напряжения на конденсаторах и в обмотках статора могут превысить напряжение сети в 2—3 раза, вызвать пробой конденсаторов и выход из строя двигателя.

Конденсаторные асинхронные двигатели, будучи двухфазными, могут работать и без конденсатора или другого фазосмещающего элемента. Но при этом к обмотке статора необходимо подвести напряжения U_A и U_B , сдвинутые по фазе относительно друг друга на 90° . Для получения таких напряжений можно использовать трехфазный источник питания с нулевым проводом (рис. 4.31, *a*), включив одну обмотку на линейное напряжение U_{AB} , другую — на фазное U_C через автотрансформатор АТ (для выравнивания напряжений на фазных обмотках). Возможно включение двигателя в трехфазную

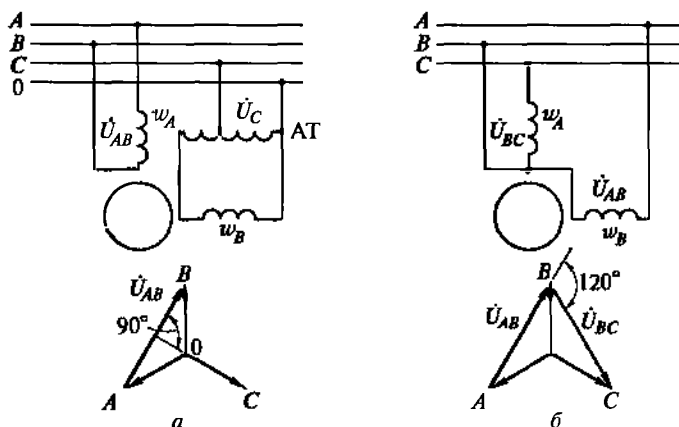


Рис. 4.31. Схемы включения двухфазного асинхронного двигателя в трехфазную сеть

сеть без нулевого провода (рис. 4.31, б), но в этом случае напряжения на обмотках *A* и *B* будут сдвинуты по фазе на 120° , что приведет к некоторому ухудшению пусковых и рабочих свойств двигателя. Однако схема включения двигателя намного упростится.

Для изменения направления вращения (реверсирования) ротора конденсаторного асинхронного двигателя необходимо поменять местами провода, соединяющие одну из обмоток статора (например, обмотку *A*) с источником питания. Переключение проводов сразу на двух обмотках статора не приведет к изменению направления вращения ротора.

Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели получили применение главным образом в бытовых электроприборах и электроинструментах, поэтому их годовой выпуск составляет десятки и даже сотни тысяч штук.

4.15.3. Включение трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть

Трехфазные асинхронные двигатели небольшой мощности могут рабо-

тать от однофазной сети. При этом двигатели могут быть использованы как однофазные с пусковым резистором r_n (рис. 4.32, а) или с пусковым конденсатором C_n (рис. 4.32, б, в) либо как конденсаторные с постоянно включенным рабочим конденсатором $C_{\text{раб}}$ и включаемым на время пуска пусковым конденсатором C_n (рис. 4.32, г, д, е).

Предварительное значение емкости (мкФ) рабочего конденсатора при частоте тока 50 Гц по схемам рис. 4.32, г, д, е:

для схемы 4.32, г

$$C_{\text{раб}} \approx 2700 I_1 / U_1; \quad (4.58)$$

для схемы 4.32, д

$$C_{\text{раб}} \approx 2800 I_1 / U_1; \quad (4.59)$$

для схемы 4.32, е

$$C_{\text{раб}} \approx 4800 I_1 / U_1. \quad (4.60)$$

Здесь I_1 — номинальный (фазный) ток в обмотке статора, А; U_1 — напряжение однофазной сети, В.

Окончательно значение $C_{\text{раб}}$ уточняется экспериментально, при этом токи в обмотках фаз двигателя при его работе с нагрузкой не должны превышать номинальное значение. При ра-

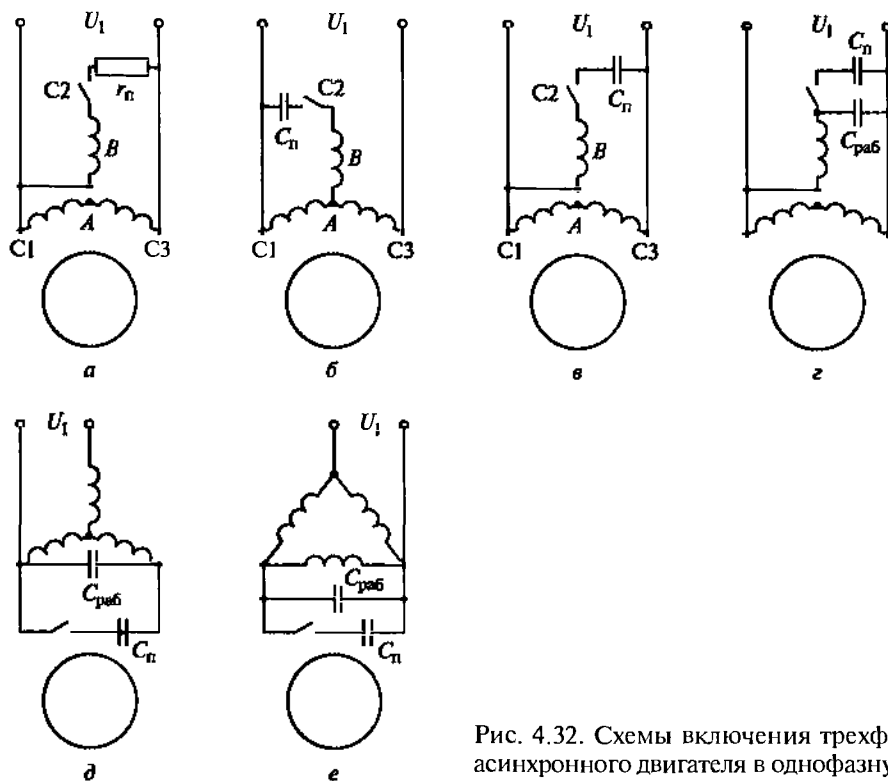


Рис. 4.32. Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть

боте трехфазного асинхронного двигателя от однофазной сети без рабочего конденсатора, т.е. как однофазного,

его номинальная мощность используется на 40—50 %, а при работе с рабочим конденсатором — на 75—80 %.

ГЛАВА 5

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ НЕТРАДИЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

5.1. Индукционный регулятор напряжения и фазорегулятор

Индукционный регулятор напряжения (ИР) представляет собой трехфазную асинхронную машину с фазным ротором, предназначенную для плав-

ного регулирования напряжения переменного тока.

Ротор ИР заторможен посредством червячной передачи, которая не только удерживает его в заданном положении, но и позволяет плавно поворачивать ротор относительно статора.

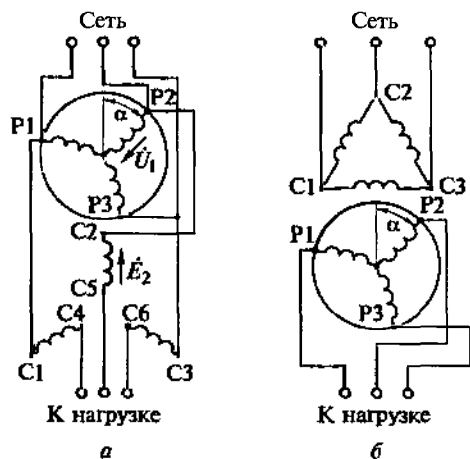


Рис. 5.1. Схемы соединения индукционного регулятора напряжения (а) и фазорегулятора (б)

Обмотки статора и ротора в ИР имеют автотрансформаторную связь (рис. 5.1, а), поэтому индукционный регулятор иногда называют *поворотным автотрансформатором*.

Напряжение сети U_1 подводится к обмотке ротора, который в этих условиях создает вращающееся магнитное поле, индуцирующее в обмотке ротора ЭДС $\dot{E}_1 = -\dot{U}_1$, а в обмотке статора — ЭДС $\dot{E}_2$ (рис. 5.2, а). Фазовый сдвиг этих ЭДС относительно друг друга зависит от взаимного пространственного положения осей обмоток

статора и ротора, определяемого углом α . При $\alpha = 0$ оси обмоток совпадают, вращающееся поле одновременно сцепляется с обеими обмотками и ЭДС $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$ совпадают по фазе (при этом $\dot{E}_2$ и напряжение $\dot{U}_1$ находятся в противофазе). При $\alpha = 180$ эл. град ЭДС $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$ окажутся в противофазе ($\dot{E}_2$ и $\dot{U}_1$ совпадают по фазе). Если пренебречь внутренними падениями напряжения, то напряжение на выходе ИР определяется геометрической суммой:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \dot{E}_2.$$

При повороте ротора ИР концы векторов $\dot{E}_2$ и $\dot{U}_2$ описывают окружность (рис. 5.2, б), при этом напряжение на выходе индукционного регулятора U_2 изменяется от $\dot{U}_{2\min} = \dot{U}_1 - \dot{E}_2$ при $\alpha = 0$ до $\dot{U}_{2\max} = \dot{U}_1 + \dot{E}_2$ при $\alpha = 180$ эл. град (рис. 5.2, в).

ИР применяются во всех случаях, где необходимо плавное регулирование напряжения переменного тока, например при лабораторных исследованиях.

Фазорегулятор (ФР) предназначен для изменения фазы вторичного напряжения относительно первичного при неизменном вторичном напряжении. В отличие от ИР обмотки ротора

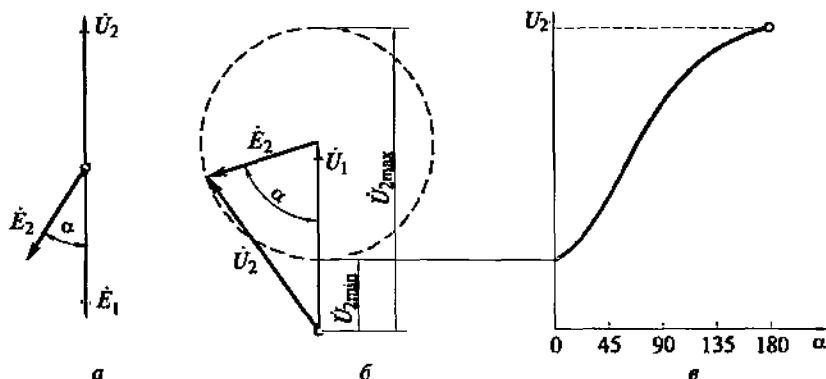


Рис. 5.2. Векторные диаграммы индукционного регулятора напряжения

и статора ФР электрически не соединены друг с другом, т.е. имеют трансформаторную связь (см. рис. 5.1, б), поэтому ФР иногда называют *поворотным трансформатором*.

Изменение фазы вторичного напряжения осуществляется поворотом ротора относительно статора. Первичной обмоткой в ФР обычно является обмотка статора. Фазорегуляторы применяют в устройствах автоматики (для фазового управления) и измерительной технике (при проверке ваттметров и счетчиков).

5.2. Однофазный асинхронный двигатель с экранированными полюсами

Для создания пускового момента в асинхронных двигателях малой мощности применяют конструкцию с явно выраженными экранированными полюсами (рис. 5.3, а), на которых располагают однофазную обмотку. Полюсы 1 имеют расщепленную на две части конструкцию, при этом на одну из частей каждого полюса надет короткозамкнутый виток (экран) в виде медного кольца 2. Ротор двигателя короткозамкнутый.

При включении обмотки статора в сеть пульсирующий поток наводит в короткозамкнутом витке (экране) ток, препятствующий нарастанию магнитного потока и вызывающий фазовый сдвиг потока в этой части полюса (рис. 5.3, б). В результате потоки в обеих частях каждого полюса оказываются сдвинутыми по фазе относительно друг друга, что в свою очередь приводит к образованию в двигателе вращающегося магнитного поля. Часто для улучшения пусковых и рабочих харак-

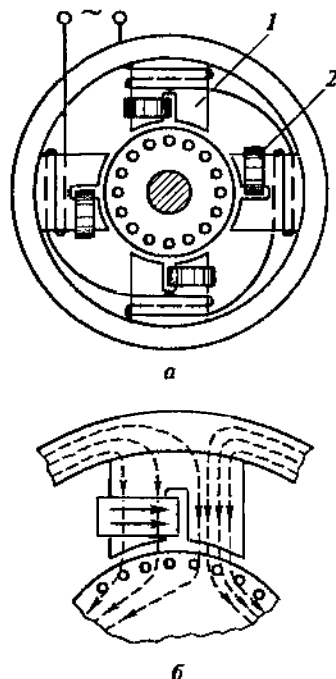


Рис. 5.3. Однофазный асинхронный двигатель с экранированными полюсами

теристик двигателя между полюсами помещают магнитные шунты в виде стальных пластинок, замыкающих края полюсных наконечников полюсов статора.

Асинхронные двигатели с экранированными полюсами нереверсивные — ротор всегда вращается в направлении от неэкранированной части полюса к экранированной. Обычно эти двигатели изготовляют мощностью не более 100 Вт и применяют для привода устройств, не требующих большого пускового момента, например, вентиляторов. Отечественная промышленность изготавливает асинхронные двигатели с экранированными полюсами серии АД...Е, предназначенные для привода приборов с вентиляторной нагрузкой. Эти двигатели мощностью от 2,5 до 25 Вт рассчитаны на

работу от сети напряжением 220 В, частотой 50 Гц. Кратность пускового момента этих двигателей $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}} = 0,5-0,6$.

5.3. Линейные асинхронные двигатели

Во многих производственных механизмах, транспортных средствах и приборных устройствах рабочий орган совершает поступательное или возвратно-поступательное движение. Для привода этих устройств и механизмов используют двигатели с вращательным движением ротора и промежуточным кинематическим звеном для преобразования вращательного движения в поступательное. Такое звено усложняет привод, вызывает дополнительные потери мощности, снижает КПД и надежность. Кинематика привода указанных устройств упрощается, если использовать линейный двигатель, у которого подвижная часть совершает поступательное или возвратно-поступательное движение. Наибольшее применение получили линейные асинхронные двигатели (ЛАД).

Принцип действия ЛАД основан на способности многофазной (трехфазной) системы токов создавать бегущее магнитное поле. Если в обычном асинхронном двигателе статор цилиндрической формы разрезать вдоль его оси и развернуть в плоскость (рис. 5.4), то получим статор линейного двигателя, называемый *индуктором 1*. Если обмотку индуктора соединить «звездой» или «треугольником» и включить в трехфазную сеть, то возникнет магнитное поле, ось которого будет перемещаться вдоль развернутой поверхности сердечника индуктора с синхронной скоростью v_1 . Такое магнитное поле называют *бегущим*.

Синхронная скорость бегущего поля пропорциональна частоте тока f_1 , длине индуктора l_n и обратно пропорциональна числу пар полюсов в обмотке индуктора p , м/с:

$$v_1 = \frac{f_1 l_n}{p}.$$

Вблизи индуктора параллельно ему расположен вторичный элемент, состоящий из магнитопровода 2 (на рис. 5.4 показан пунктирными линиями), в пазы которого заложены алю-

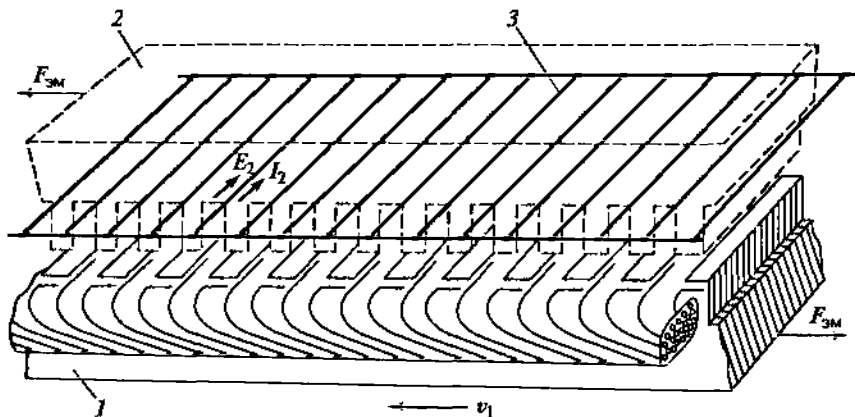


Рис. 5.4. Функциональная схема линейного асинхронного двигателя

миниевые или медные стержни 3 короткозамкнутой обмотки. Бегущее поле индуктора, сцепляясь со стержнями 3 короткозамкнутой обмотки, наводит в них ЭДС E_2 , которая создает токи I_2 . Взаимодействуя с бегущим магнитным полем, эти токи создают электромагнитные силы $F_{эм}$, стремящиеся сместить магнитопроводы индуктора 1 и вторичного элемента 2 относительно друг друга в противоположных направлениях. Если один из магнитопроводов, например индуктора, закрепить неподвижно, то другой магнитопровод, называемый в этом случае *бегунком*, будет линейно перемещаться относительно первого в направлении движения бегущего поля. В итоге электроэнергия, поступающая в обмотку индуктора из сети, будет преобразовываться в механическую энергию линейного (поступательного) движения. Если неподвижным сделать вторичный элемент, то бегунком станет индуктор, который будет перемещаться линейно в направлении, противоположном движению создаваемого им бегущего поля.

Электромагнитная сила, вызывающая линейное перемещение бегунка линейного двигателя, пропорциональна числу пар полюсов обмотки индуктора p , току вторичного элемента I_2 и бегущему магнитному полю Φ_2 :

$$F_{эм} = c_m p I_2 \Phi_2 \cos \psi_2,$$

где c_m — постоянный коэффициент, определяемый конструкцией линейного двигателя; ψ_2 — угол сдвига фаз между ЭДС E_2 и током I_2 во вторичном элементе двигателя.

Скорость движения бегунка v_2 всегда меньше скорости бегущего поля v_1 , так как только в этом случае в обмотке вторичного элемента ЛАД наводится ЭДС. Таким образом, в ЛАД, так

же как и в двигателях с вращательным движением ротора, скольжение s характеризует отставание подвижной части двигателя от бегущего поля:

$$s = \frac{v_1 - v_2}{v_1}.$$

Имеются конструкции ЛАД, в которых в качестве вторичного элемента используется полоса из меди, алюминия или стали, обладающей ферромагнитными свойствами. Возможно применение составного вторичного элемента, например полосы из ферромагнитной стали, покрытой слоем меди.

Линейные асинхронные двигатели используют для привода заслонок, подъемно-транспортных средств, металлообрабатывающих станков, в электроприводе манипуляторов и в других случаях, где рабочий орган должен совершать поступательное или возвратно-поступательное движение.

Рассмотрим несколько примеров практического применения ЛАД. На рис. 5.5, а показано устройство привода тележки мостового крана с ЛАД. 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 — вторичный элемент ЛАД.

На рис. 5.5, б показан пример применения ЛАД для привода ленточного конвейера, транспортирующего сыпучие материалы 1 из бункера 2. Груз переносится металлической лентой 4, укрепленной на барабанах 5. Металлическая лента — вторичный элемент ЛАД. Электромагнитное усилие, приводящее ленту в движение, возникает на участке ленты, проходящем в

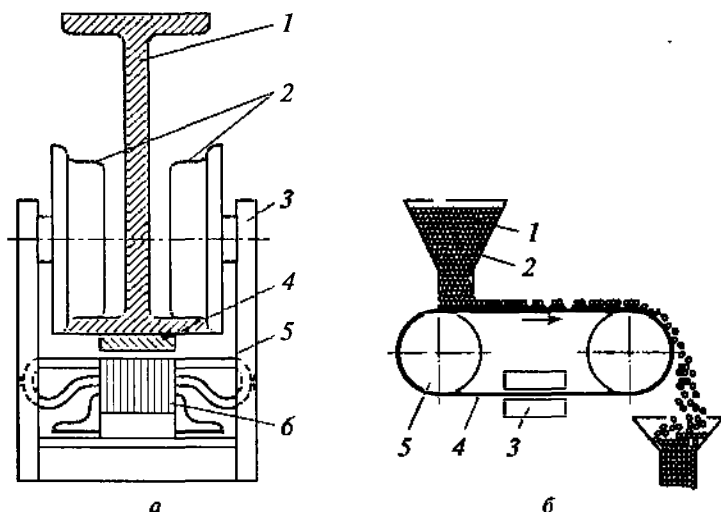


Рис. 5.5. Примеры применения линейных двигателей в приводе тележки мостового крана (а) и ленты транспортера (б)

воздушном зазоре между двумя индукторами 3.

Недостатки линейных асинхронных двигателей: явление краевого эффекта, трудность увеличения электромагнитного усилия, создаваемого двигателем. Явление краевого эффекта представляет собой комплекс электромагнитных процессов, обусловленных разомкнутой конструкцией статора (индуктора). Нежелательные последствия краевого эффекта: появление «паразитных» тормозных усилий, направленных встречно движению под-

вижной части двигателя; возникновение поперечных сил, стремящихся сместить подвижную часть двигателя в поперечном направлении. Краевой эффект вызывает ряд других нежелательных явлений, ухудшающих рабочие характеристики линейных двигателей. В двигателях с вращательным движением ротора электромагнитный момент, развиваемый двигателем, усиливается применением редуктора, понижающего частоту вращения. В ЛАД такое усиление возможно путем применения рычага.

ГЛАВА 6

СЕРИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

6.1. Асинхронные двигатели серии 4А

Серия трехфазных асинхронных двигателей 4А была первой серией,

которая удовлетворяла рекомендациям Международного электротехнического комитета (МЭК) по увязке габаритных размеров электрических машин с установочно-присоединитель-

ными размерами. Эта мера была прогрессивной еще и потому, что обеспечивала взаимозаменяемость двигателей серии 4А с двигателями некоторых других фирм. Впервые в качестве габаритного параметра была принята высота оси вращения.

Благодаря применению более совершенных магнитных и изоляционных материалов, двигатели этой серии по своим экономическим и техническим параметрам становились конкурентными. По сравнению с двигателями предыдущих серий (АО, АО2), мощность двигателей серии 4А повысилась в среднем на две ступени при одинаковой высоте оси вращения.

Серия 4А содержит асинхронные двигатели общего назначения мощностью до 400 кВт напряжением до 660 В. Серия 4А включает двигатели двух исполнений по степени защиты: закрытое исполнение IP44 с охлаждением методом обдува оребренной поверхности станины IC0141 и защищенное исполнение IP23 с внутренней самовентиляцией IC01.

Помимо основного исполнения двигателей с короткозамкнутым ротором, серия 4А включает ряд модификаций и специализированных исполнений.

Модификации серии 4А:

двигатели с повышенным пусковым моментом; двигатели с повышенным скольжением; многоскоростные; с фазным ротором; двигатели с частотой питания 60 Гц; лифтовые и некоторые другие.

Специализированные исполнения двигателей разделяются по условиям окружающей среды (химостойкого исполнения, сельскохозяйственного исполнения, тропического исполнения и т.д.).

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии 4А основного исполнения:

4А	X	X	X	X	X	X	X
1	2	3	4	5	6	7	8

1 — обозначение серии (4 — порядковый номер серии; А — асинхронные);

2 — исполнение по степени защиты: IP23 — буква Н; отсутствие буквы — исполнение IP44;

3 — материал станины и подшипниковых щитов: А — станина и щиты алюминиевые; Х — станина алюминиевая, а щиты — чугунные или наоборот; отсутствие буквы — станина и щиты чугунные или стальные;

4 — высота оси вращения (две или три цифры);

5 — условная длина станины (S, M, L);

6 — условная длина сердечника статора (если при данной высоте оси вращения имеются два типоразмера, то они обозначаются буквами А или В, если один типоразмер, то буква отсутствует);

7 — число полюсов: 2, 4, 6, 8, 10, 12;

8 — климатическое исполнение и категория размещения (УЗ — для умеренного климата в закрытом помещении с естественной вентиляцией).

Двигатели серии 4А рассчитаны для работы от трехфазной сети частотой 50 Гц, напряжением 220, 380, 660 В (три вывода обмотки статора) или 220/380, 380/660 В (шесть выводов обмотки статора). Соединение обмотки статора «звезда» или «треугольник».

Ниже приведены технические данные (табл. 6.1), габаритные и установочно-присоединительные размеры (табл. 6.2) трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А основного исполнения, а также технические данные трехфазных асинхронных двигателей серии 4А с фазным ротором (табл. 6.3).

Стремление улучшить технико-экономические показатели двигателей

Таблица 6.1. Технические данные трехфазных асинхронных двигателей серии 4А
основного исполнения (IP44; IC0141)

Типоразмеры	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{min}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	J , кг·м ²
Синхронная частота вращения 3000 об/мин									
4АА50А2У3	0,09	2740	60,0	0,70	2,2	2,0	1,2	5,0	$0,24 \cdot 10^{-4}$
4АА50В2У3	0,12	2710	63,0	0,70	2,2	2,0	1,2	5,0	$0,27 \cdot 10^{-4}$
4АА56А2У3	0,18	2800	66,0	0,76	2,2	2,0	1,2	5,0	$4,15 \cdot 10^{-4}$
4АА56ВУ3	0,25	2770	68,0	0,77	2,2	2,0	1,2	5,0	$4,65 \cdot 10^{-4}$
4А63А2У3	0,37	2750	70,0	0,86	2,2	2,0	1,2	5,0	$7,63 \cdot 10^{-4}$
4А63В2У3	0,55	2740	73,0	0,86	2,2	2,0	1,2	5,0	$9,0 \cdot 10^{-4}$
4А71А2У3	0,75	2840	77,0	0,87	2,2	2,0	1,2	5,5	$9,75 \cdot 10^{-4}$
4А71В2У3	1,10	2810	77,5	0,87	2,2	2,0	1,2	5,5	$10,5 \cdot 10^{-4}$
4А80А2У3	1,50	2850	81,0	0,85	2,2	2,0	1,2	6,5	$18,3 \cdot 10^{-4}$
4А80В2У3	2,20	2850	83,0	0,87	2,2	2,0	1,2	6,5	$21,3 \cdot 10^{-4}$
4А90L2У3	3,00	2840	84,5	0,88	2,2	2,0	1,2	6,5	$35,3 \cdot 10^{-4}$
4А100S2У3	4,00	2880	86,5	0,89	2,2	2,0	1,2	7,5	$59,3 \cdot 10^{-4}$
4А100L2У3	5,50	2880	87,5	0,91	2,2	2,0	1,2	7,5	$75 \cdot 10^{-4}$
4А112M2У3	7,50	2900	87,5	0,88	2,2	2,0	1,0	7,5	$1,0 \cdot 10^{-2}$
4А132M2У3	11,0	2900	88,0	0,90	2,2	1,6	1,0	7,5	$2,25 \cdot 10^{-2}$
4А160S2У3	15,0	2940	88,0	0,91	2,2	1,4	1,0	7,5	$4,75 \cdot 10^{-2}$
4А160M2У3	18,5	2940	88,5	0,92	2,2	1,4	1,0	7,5	$5,25 \cdot 10^{-2}$
4А180S2У3	22,0	2940	88,5	0,91	2,2	1,4	1,0	7,5	$7,0 \cdot 10^{-2}$
4А180M2У3	30,0	2945	90,5	0,90	2,2	1,4	1,0	7,5	$8,5 \cdot 10^{-2}$
4А200M2У3	37,0	2945	90,0	0,89	2,2	1,4	1,0	7,5	$14,5 \cdot 10^{-2}$
4А200L2У3	45,0	2945	91,0	0,90	2,2	1,4	1,0	7,5	$16,8 \cdot 10^{-2}$
4А225M2У3	55,0	2945	91,0	0,92	2,2	1,2	1,0	7,5	$25 \cdot 10^{-2}$
4А250S2У3	75,0	2960	91,0	0,89	2,2	1,2	1,0	7,5	$46 \cdot 10^{-2}$
4А250M2У3	90,0	2960	92,0	0,90	2,2	1,2	1,0	7,5	$52 \cdot 10^{-2}$
4А280S2У3	110,0	2970	91,0	0,89	2,2	1,2	1,0	7,0	1,09
4А280M2У3	132,0	2970	91,5	0,89	2,2	1,2	1,0	7,0	1,19
4А315S2У3	160,0	2970	92,0	0,90	0,9	1,0	0,9	7,0	1,40
4А315M2У3	200,0	2970	92,5	0,90	0,9	1,0	0,9	7,0	1,63
4А355S2У3	250,0	2970	92,5	0,90	0,9	1,0	0,9	7,0	2,85
4А355M2У3	315,0	2970	93,0	0,91	0,9	1,0	0,9	7,0	3,23

Продолжение табл. 6.1

Типоразмеры	$P_{ном},$ кВт	$n_{ном},$ об/мин	$\eta_{ном},$ %	$\cos \varphi_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_n/M_{ном}$	$M_{пн}/M_{ном}$	$I_n/I_{ном}$	$J, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Синхронная частота вращения 1500 об/мин									
4АА50А4У3	0,06	1389	50,0	0,6	2,2	2,0	1,2	5,0	$0,29 \cdot 10^{-4}$
4АА50В4У3	0,09	1370	55,0	0,6	2,2	2,0	1,2	5,0	$0,33 \cdot 10^{-4}$
4АА56А4У3	0,12	1375	63,0	0,66	2,2	2,0	1,2	5,0	$7,0 \cdot 10^{-4}$
4АА56В4У3	0,18	1365	64,0	0,64	2,2	2,0	1,2	5,0	$7,88 \cdot 10^{-4}$
4АА63А4У3	0,25	1380	68,0	0,65	2,2	2,0	1,2	5,0	$12,4 \cdot 10^{-4}$
4АА63В4У3	0,37	1365	68,0	0,69	2,2	2,0	1,2	5,0	$13,0 \cdot 10^{-4}$
4А71А4У3	0,55	1390	70,5	0,7	2,2	2,0	1,6	4,5	$13,8 \cdot 10^{-4}$
4А71В4У3	0,75	1390	72,0	0,73	2,2	2,0	1,6	4,5	$14,3 \cdot 10^{-4}$
4А80А4У3	1,1	1420	75,0	0,81	2,2	2,0	1,6	5,0	$32,3 \cdot 10^{-4}$
4А80В4У3	1,5	1415	77,0	0,83	2,2	2,0	1,6	5,0	$33,3 \cdot 10^{-4}$
4А90Л4У3	2,2	1425	80,0	0,83	2,2	2,0	1,6	6,0	$56,0 \cdot 10^{-4}$
4А100S4У3	3,0	1435	82,0	0,83	2,4	2,0	1,6	6,0	$86,8 \cdot 10^{-4}$
4А100Л4У3	4,0	1430	84,0	0,84	2,4	2,0	1,6	6,0	$1,13 \cdot 10^{-2}$
4А112М4У3	5,5	1445	85,5	0,85	2,2	2,0	1,6	7,0	$1,75 \cdot 10^{-2}$
4А132S4У3	7,5	1455	87,5	0,86	3,0	2,2	1,7	7,5	$2,75 \cdot 10^{-2}$
4А132М4У3	11	1460	84,5	0,87	3,0	2,2	1,7	7,5	$4,0 \cdot 10^{-2}$
4А160S4У3	15	1465	88,5	0,88	2,3	1,4	1,0	7,0	$10,3 \cdot 10^{-2}$
4А160М4У3	18,5	1465	89,5	0,88	2,3	1,4	1,0	7,0	$12,8 \cdot 10^{-2}$
4А180S4У3	22	1470	90,0	0,90	2,3	1,4	1,0	6,5	$19,0 \cdot 10^{-2}$
4А180М4У3	30	1470	91,0	0,90	2,3	1,4	1,0	6,5	$23,3 \cdot 10^{-2}$
4А200М4У3	37	1475	91,0	0,90	2,5	1,4	1,0	7,0	$36,8 \cdot 10^{-2}$
4А200Л4У3	45	1475	92,0	0,90	2,5	1,4	1,0	7,0	$44,5 \cdot 10^{-2}$
4А225М4У3	55	1480	92,5	0,90	2,5	1,3	1,0	7,0	$64,0 \cdot 10^{-2}$
4А250S4У3	75,0	1480	93,0	0,90	2,3	1,2	1,0	7,0	1,02
4А250М4У3	90,0	1480	93,0	0,91	2,3	1,2	1,0	7,0	1,17
4А280S4У3	110,0	1470	92,5	0,90	2,0	1,2	1,0	5,5	2,3
4А280М4У3	132,0	1480	93,0	0,90	2,0	1,3	1,0	5,5	2,48
4А315S4У3	160,0	1480	93,5	0,91	2,2	1,3	0,9	6,0	3,08
4А315М4У3	200,0	1480	94,0	0,92	2,2	1,3	0,9	6,0	3,63
4А355S4У3	250,0	1485	94,5	0,92	2,0	1,2	0,9	7,0	6,0
4А355М4У3	315,0	1485	94,5	0,92	2,0	1,2	0,9	7,0	7,05

Продолжение табл. 6.1

Типоразмеры	$P_{ном},$ кВт	$n_{ном},$ об/мин	$\eta_{ном},$ %	$\cos \varphi_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_{II}/M_{ном}$	$M_{min}/M_{ном}$	$I_n/I_{ном}$	$J, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Синхронная частота вращения 1000 об/мин									
4A63A6Y3	0,18	885	56,0	0,62	2,2	2,2	1,5	3,0	$17,4 \cdot 10^{-4}$
4A63B6Y3	0,25	890	59,0	0,62	2,2	2,2	1,5	3,0	$19,0 \cdot 10^{-4}$
4A71A6Y3	0,37	910	64,5	0,69	2,2	2,0	1,8	4,0	$19,3 \cdot 10^{-4}$
4A71B6Y3	0,55	900	67,5	0,71	2,2	2,0	1,8	4,0	$20,3 \cdot 10^{-4}$
4A80A6Y3	0,75	915	69,0	0,74	2,2	2,0	1,6	4,0	$46,0 \cdot 10^{-4}$
4A80B6Y3	1,10	920	74,0	0,74	2,2	2,0	1,6	4,0	$46,3 \cdot 10^{-4}$
4A90L6Y3	1,50	935	75,0	0,74	2,2	2,0	1,7	4,5	$73,5 \cdot 10^{-4}$
4A100L6Y3	2,20	950	81,0	0,73	2,2	2,0	1,6	5,0	$1,31 \cdot 10^{-2}$
4A112MA6Y3	3,0	955	81,0	0,76	2,5	2,0	1,8	6,0	$1,75 \cdot 10^{-2}$
4A112MB6Y3	4,0	950	82,0	0,81	2,5	2,0	1,8	6,0	$2,0 \cdot 10^{-2}$
4A132S6Y3	5,50	965	85,0	0,80	2,5	2,0	1,8	6,5	$4,0 \cdot 10^{-2}$
4A132M6Y3	7,50	970	85,5	0,81	2,5	2,0	1,8	6,5	$5,75 \cdot 10^{-2}$
4A160S6Y3	11,0	975	86,0	0,86	2,0	1,2	1,0	6,0	$13,8 \cdot 10^{-2}$
4A160M6Y3	15,0	975	87,5	0,87	2,0	1,2	1,0	6,0	$18,3 \cdot 10^{-2}$
4A180M6Y3	18,5	975	88,0	0,87	2,0	1,2	1,0	5,0	$22,0 \cdot 10^{-2}$
4A200M6Y3	22,0	975	90,0	0,90	2,4	1,3	1,0	6,5	$40,0 \cdot 10^{-2}$
4A200L6Y3	30,0	980	90,5	0,90	2,4	1,3	1,0	6,5	$45,3 \cdot 10^{-2}$
4A250S6Y3	45,0	985	91,5	0,89	2,1	1,2	1,0	6,5	1,16
4A250M6Y3	55,0	985	91,5	0,89	2,1	1,2	1,0	6,5	1,26
4A280S6Y3	75,0	985	92,0	0,89	2,2	1,4	1,2	5,5	2,93
4A280M6Y3	90,0	985	92,5	0,89	2,2	1,4	1,2	5,5	3,38
4A315S6Y3	110,0	985	93,0	0,90	2,2	1,4	0,9	6,5	4,0
4A315M6Y3	132,0	985	93,5	0,90	2,2	1,4	0,9	6,5	4,5
4A355S6Y3	160,0	985	93,5	0,90	2,2	1,4	0,9	6,5	7,33
4A355M6Y3	200,0	985	94,0	0,90	2,2	1,4	0,9	6,5	8,8
Синхронная частота вращения 750 об/мин									
4A71B8Y3	0,25	680	56,0	0,65	1,7	1,6	1,2	3,0	$18,5 \cdot 10^{-4}$
4A80A8Y3	0,37	675	61,5	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5	$33,8 \cdot 10^{-4}$
4A80B8Y3	0,55	700	64,0	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5	$40,5 \cdot 10^{-4}$
4A90LA8Y3	0,75	700	68,0	0,62	1,9	1,6	1,2	3,5	$67,5 \cdot 10^{-4}$
4A90LB8Y3	1,10	700	70,0	0,68	1,9	1,6	1,2	3,5	$86,3 \cdot 10^{-4}$
4A100L8Y3	1,50	700	74,0	0,65	1,9	1,6	1,2	4,0	$1,3 \cdot 10^{-2}$

Окончание табл. 6.1

Типоразмеры	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_T/M_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$I_D/I_{ном}$	J , кг·м ²
4A112MA8Y3	2,20	700	76,5	0,71	2,2	1,9	1,4	5,0	$1,75 \cdot 10^{-2}$
4A112MB8Y3	3,0	700	79,0	0,74	2,2	1,9	1,4	5,0	$2,5 \cdot 10^{-2}$
4A132S8Y3	4,0	720	83,0	0,7	2,6	1,9	1,4	5,5	$4,25 \cdot 10^{-2}$
4A132M8Y3	5,5	720	83,0	0,74	2,6	1,9	1,4	5,5	$5,75 \cdot 10^{-2}$
4A160S8Y3	7,5	730	86,0	0,75	2,2	1,4	1,0	6,0	$13,8 \cdot 10^{-2}$
4A160M8Y3	11,0	730	87,0	0,75	2,2	1,4	1,0	6,0	$18,0 \cdot 10^{-2}$
4A180M8Y3	15,0	730	87,0	0,82	2,0	1,2	1,0	6,0	$25,0 \cdot 10^{-2}$
4A200M8Y3	18,5	735	88,5	0,84	2,2	1,2	1,0	5,5	$40,0 \cdot 10^{-2}$
4A200L8Y3	22,0	730	88,5	0,84	2,0	1,2	1,0	5,5	$45,3 \cdot 10^{-2}$
4A225M8Y3	30,0	735	90,0	0,81	2,1	1,3	1,0	6,0	$73,8 \cdot 10^{-2}$
4A250S8Y3	37,0	735	90,0	0,83	2,0	1,2	1,0	6,0	1,16
4A250M8Y3	45,0	740	91,0	0,84	2,0	1,2	1,0	6,0	1,36
4A280S8Y3	55,0	735	92,0	0,84	2,0	1,2	1,0	5,5	3,18
4A280M8Y3	75,0	735	92,5	0,85	2,0	1,2	1,0	5,5	4,13
4A315S8Y3	90,0	740	93,0	0,85	2,3	1,2	0,9	6,5	4,93
4A315M8Y3	110,0	740	93,0	0,85	2,3	1,2	0,9	6,5	5,85
4A355S8Y3	132,0	740	93,5	0,85	2,2	1,2	0,9	6,5	9,05
4A355M8Y3	160,0	740	93,5	0,85	2,2	1,2	0,9	6,5	10,2
Синхронная частота вращения 600 об/мин									
4A250S10Y3	30,0	590	88,0	0,81	1,9	1,2	1,0	6,0	1,36
4A250M10Y3	37,0	590	89,0	0,81	1,9	1,2	1,0	6,0	1,60
4A280S10Y3	37,0	590	91,0	1,78	1,8	1,0	1,0	6,0	3,6
4A280M10Y3	45,0	590	91,5	0,78	1,8	1,0	1,0	6,0	3,78
4A315S10Y3	55,0	590	92,0	0,79	1,8	1,0	0,9	6,0	5,25
4A315M10Y3	75,0	590	92,0	0,8	1,8	1,0	0,9	6,0	6,18
4A355S10Y3	90,0	590	92,5	0,83	1,8	1,0	0,9	6,0	9,33
4A355M10Y3	110,0	590	93,0	0,83	1,8	1,0	0,9	6,0	10,9
Синхронная частота вращения 500 об/мин									
4A315S10Y3	45,0	490	90,5	0,75	1,8	1,0	0,9	6,0	5,25
4A315M10Y3	55,0	490	91,0	0,75	1,8	1,0	0,9	6,0	6,18
4A355S10Y3	75,0	490	91,5	0,76	1,8	1,0	0,9	6,0	9,33
4A355M10Y3	90,0	495	92,0	0,76	1,8	1,0	0,9	6,0	10,9

Technical drawing of a centrifugal pump assembly. The drawing includes a side view on the left and a front view on the right. The side view shows the pump housing with dimensions l_1 , l_{31} , l_{10} , and l_{30} . The front view shows the pump housing with dimensions d_{30} , h_{31} , h , d_{10} , and b_{10} . A cross-section A-A is indicated, showing the internal components with dimensions d_1 and h .

Типо-размер	Число полюсов	Габаритные размеры, мм			Установочно-присоединительные размеры, мм								Масса, кг
		b ₃₀	h ₃₁	d ₃₀	h	l ₁₀	l ₃₁	d ₁	d ₁₀	b ₁₀	h		
4AA50	2; 4	176	142	112	20	63	32	9	5,8	80	50	3,3	
4AA56	2; 4	194	152	128	23	71	36	11	5,8	90	56	4,5	
4AA63	2; 4; 6	216	164	138	30	80	40	14	7	100	63	6,3	
4A71	2; 4; 6; 8	285	$\frac{201^*}{223}$	170	40	90	45	19	7	112	71	15,1	
4A80A	2; 4; 6; 8	300	$\frac{218^*}{240}$	186	50	100	50	22	10	125	80	17,5	
4A80B	2; 4; 6; 8	320	$\frac{243^*}{260}$									20,0	
4A90L	2; 4; 6; 8	350	$\frac{243^*}{260}$	208		125	56	24		140	90	28,7	
4A100S	2; 4; 6; 8	365	265	235	60	112	63	28	12	160	100	36	
4A100L	2; 4; 6; 8	395	280			140						42	
4A112M	2; 4; 6; 8	452	310	260	80	140	70	32	12	190	112	56	
4A132S	4; 6; 8	480	350	302			178	89		38	216	132	77
4A132M	2; 4; 6; 8	530				93							
4A160S	2	624	430	358	110	178	108	42	15	254	160	130	
	4; 6; 8							48				135	
4A160M	2	667				210		42				145	
	4; 6; 8							48				160	
4A180S	2	662	470	410		203	121	48	15	279	180	165	
	4; 6; 8							55				175	
4A180M	2	702						241				48	185
	4; 6; 8											55	195
													255

Окончание табл. 6.2

Типо- размер	Число полю- сов	Габаритные размеры, мм			Установочно-присоединительные размеры, мм							Мас- са, кг
		l_{30}	h_{31}	d_{30}	h	h_0	l_{11}	d_1	d_{10}	b_{10}	h	
4A200M	2	760	535	450	110	267	133	60	19	318	200	270
	4, 6, 8	790			140			60				
4A200L	2	800	535	450	110	305	133	55	19	318	200	280
	4; 6; 8	830			140			60				310
4A225M	2	810	575	494	110	311	149	55	24	356	225	355
	4; 6; 8	840						65				355
4A250S	2	915	640	554	140	349	168	75	24	406	250	470
	4; 6; 8							75				490
4A250M	2	955	640	554	140	349	168	65	24	406	250	510
	4; 6; 8							75				535

* В знаменателе указан размер для двигателей с числом выводных концов более шести.

Таблица 6.3. Технические данные трехфазных асинхронных двигателей серии 4А с фазным ротором 4АК и 4АНК

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$s_{ном}$, %	$M_{max}/M_{ном}$	$I_{2ном}$, А	E_{20} , В	Масса, кг
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
4AK160S4Y3	11,0	86,5	0,86	5,0	3,0	22	305	160
4AK160M4Y3	14,0	88,5	0,87	4,0	3,5	29	300	185
4AK180M4Y3	18,0	89,0	0,88	3,5	4,0	38	295	250
4AK200M4Y3	22,0	90,0	0,87	2,5	4,0	45	340	305
4AK200L4Y3	30,0	90,5	0,87	2,5	4,0	55	350	325
4AK225M4Y3	37,0	90,0	0,87	3,5	3,0	160	160	415
4AK250SA4Y3	45,0	91,0	0,88	3,0	3,0	170	230	555
4AK250B4Y3	55,0	90,5	0,9	3,0	3,0	170	200	595
4AK250M4Y3	71,0	91,5	0,86	2,5	3,0	170	250	640
Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
4AK160S6Y3	7,5	82,5	0,77	5,0	3,5	18	300	170
4AK160M6Y3	10,0	84,5	0,76	4,5	3,8	20	310	200
4AK180M6Y3	13,0	85,5	0,8	4,5	4,0	25	325	240
4AK200M6Y3	18,5	88,0	0,81	3,5	3,5	35	360	300
4AK200L6Y3	22,0	88,0	0,8	3,5	3,5	45	330	315
4AK225M6Y3	30,0	89,0	0,85	3,5	2,5	150	140	405
4AK250S6Y3	37,0	89,0	0,84	3,5	2,5	165	150	540
4AK250M6Y3	45,0	90,5	0,87	3,0	2,5	160	180	600

Продолжение табл. 6.3

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$s_{ном}$, %	$M_{max}/M_{ном}$	$I_{2ном}$, А	E_{20} , В	Масса, кг
<i>Синхронная частота вращения 750 об/мин</i>								
4AK160S8Y3	5,5	80,0	0,70	6,5	2,5	14	300	170
4AK160M8Y3	7,5	82,0	0,70	6,0	3,0	16	290	200
4AK180M8Y3	11,0	85,5	0,72	4,0	3,5	25	270	260
4AK200M8Y3	15,0	86,0	0,70	3,5	3,0	28	360	300
4AK200L8Y3	18,5	86,0	0,73	3,5	3,0	40	300	320
4AK225M8Y3	22,0	87,0	0,82	4,5	2,2	140	102	400
4AK250S8Y3	30,0	88,5	0,81	4,0	2,2	155	125	540
4AK250M8Y3	37,0	89,0	0,8	3,5	2,2	155	148	595
<i>Синхронная частота вращения 1500 об/мин</i>								
4АНК160S4Y3	14	86,5	0,85	5,0	3,0	27	330	140
4АНК160M4Y3	17	88,0	0,87	5,0	3,5	34	315	160
4АНК180S4Y3	22	87,0	0,86	5,5	3,2	43	300	190
4АНК180M4Y3	30	88,0	0,81	4,5	3,3	63	290	220
4АНК200M4Y3	37	90,0	0,88	3,0	3,0	62	360	290
4АНК200L4Y3	45	90,0	0,88	3,5	3,0	75	375	315
4АНК225M4Y3	55	89,5	0,87	4,0	2,5	200	170	405
4АНК250SA4Y3	75	90,0	0,88	4,5	2,3	250	180	500
4АНК250SB4Y3	90	91,5	0,87	4,0	2,5	260	220	540
4АНК250M4Y3	110	92,0	0,90	3,5	2,5	260	250	585
4АНК280S4Y3	132	92,0	0,88	2,9	2,0	330	251	725
4АНК280M4Y3	160	92,5	0,88	2,6	2,0	330	300	775
4АНК315S4Y3	200	93,0	0,89	2,5	2,0	396	312	910
4АНК315M4Y3	250	93,0	0,90	2,5	2,0	425	360	990
4АНК355S4Y3	315	93,5	0,90	2,2	2,0	460	420	1240
4АНК355M4Y3	400	94,0	0,90	2,0	2,0	485	505	1380
<i>Синхронная частота вращения 1000 об/мин</i>								
4АНК180S6Y3	13	83,5	0,81	7,0	3,0	42	205	180
4АНК180M6Y3	17	85,0	0,82	6,0	3,0	32,5	335	200
4АНК200M6Y3	22	88,0	0,81	3,5	3,0	37	380	285
4АНК200L6Y3	30	88,5	0,82	4,0	3,0	46	375	315
4АНК225M6Y3	37	89,0	0,86	4,0	1,9	180	140	400
4АНК250SA6Y3	45	89,5	0,86	4,0	2,3	200	155	470
4АНК250SB6Y3	55	91,0	0,88	3,5	2,5	185	190	510
4АНК250M6Y3	75	91,5	0,85	3,0	2,5	200	250	585

Окончание табл. 6.3

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$s_{ном}$, %	$M_{max}/M_{ном}$	$I_{2ном}$, А	E_{20} , В	Масса, кг
4АНК280S6Y3	90	90,0	0,88	3,6	1,9	277	202	685
4АНК280M6Y3	110	91,5	0,87	3,6	1,9	297	230	735
4АНК315S6Y3	132	92,0	0,88	3,0	1,9	320	257	845
4АНК315M6Y3	160	92,5	0,88	3,0	1,9	352	291	910
4АНК355S6Y3	200	93,0	0,89	2,5	1,8	411	304	1180
4АНК355M6Y3	250	93,0	0,89	2,5	1,8	401	380	1305
<i>Синхронная частота вращения 750 об/мин</i>								
4АНК180S8Y3	11	85,0	0,72	5,0	3,2	22,5	315	195
4АНК180M8Y3	14	86,5	0,69	4,5	3,5	28	310	225
4АНК200M8Y3	18,5	86,0	0,78	4,5	2,5	30	380	285
4АНК200L8Y3	22	87,0	0,79	4,5	2,5	40	330	315
4АНК225M8Y3	30	86,5	0,8	5,0	1,8	165	120	400
4АНК250SA8Y3	37	87,5	0,8	5,5	2,2	190	115	475
4АНК250SB8Y3	45	89,0	0,82	4,0	2,2	190	140	515
4АНК250M8Y3	55	89,5	0,83	3,5	2,2	185	190	575
4АНК280S8Y3	75	90,5	0,84	4,0	1,9	257	190	700
4АНК280M8Y3	90	90,5	0,84	4,0	1,9	267	214	755
4АНК315S8Y3	110	91,5	0,84	3,5	1,9	311	225	910
4АНК315M8Y3	132	92,0	0,84	3,5	1,9	364	247	980
4АНК355S8Y3	160	92,5	0,86	2,7	1,7	353	285	1215
4АНК355M8Y3	200	92,5	0,86	2,7	1,7	359	350	1360
<i>Синхронная частота вращения 600 об/мин</i>								
4АНК280S10Y3	45	89,0	0,78	5,0	1,8	178	162	625
4АНК280M10Y3	55	89,5	0,79	4,5	1,8	180	185	675
4АНК315S10Y3	75	90,0	0,80	4,5	1,8	221	217	845
4АНК315M10Y3	90	90,5	0,81	4,2	1,8	223	260	920
4АНК355S10Y3	110	90,5	0,81	3,8	1,7	242	283	1180
4АНК355M10Y3	132	91,0	0,81	3,6	1,7	257	330	1260
<i>Синхронная частота вращения 500 об/мин</i>								
4АНК315S12Y3	55	89,0	0,75	5,0	1,8	235	165	845
4АНК315M12Y3	75	90,0	0,75	5,0	1,8	221	207	920
4АНК355S12Y3	90	89,5	0,73	4,0	1,7	259	222	1160
4АНК355M12Y3	110	90,0	0,73	4,0	1,7	265	265	1245

Примечание. E_{20} — ЭДС обмотки фазного ротора, измеренная на выводах неподвижного разомкнутого ротора при номинальном напряжении на обмотке статора.

серии 4А привело к созданию серии 4АМ. Асинхронные двигатели этой серии имеют более низкий уровень шума, меньшую массу идентичных типоразмеров.

По номинальным значениям параметров, климатическим факторам окружающей среды, условиям эксплуатации двигатели серии 4АМ соответствуют двигателям серии 4А со степенью защиты IP44. Наряду с этим в серию 4АМ внесены некоторые конструктивные изменения: применение закрытых подшипников, упрощение конструкции подшипниковых узлов с пополнением смазки, увеличение числа лопастей вентилятора и др. По видам модификаций и специализированных исполнений серия 4АМ аналогична серии 4А.

6.2. Трехфазные асинхронные двигатели серии АИ

Двигатели серии АИ разработаны в соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК). Однако в связи с отсутствием единой увязки рядов мощностей и высот осей вращения двигатели серии АИ изготавливают в двух вариантах увязки (см. 2.11):

1) вариант, соответствующий рекомендациям МЭК, — обозначается АИР, используется главным образом на внутреннем рынке;

2) вариант, соответствующий рекомендациям CELENEC-DOKUMENT 28/64, обозначается АИС и предназначен главным образом для внешнего рынка.

Сравнение рядов мощности вариантов АИР и АИС показывает, что при одной и той же высоте оси вращения мощность двигателей варианта АИР

на одну ступень выше, чем мощность двигателя варианта АИС. Это позволяет максимально унифицировать между собой оба варианта исполнения по активной части двигателей. Двигатели изготавливают на частоту переменного тока 50 Гц, напряжением 220, 380, 660 В с тремя выводами обмотки статора, либо 220/380 и 380/660 В с шестью выводами обмотки статора; для поставок на экспорт возможно изготовление двигателей на частоту 60 Гц.

По сравнению с ранее разработанной серией асинхронных двигателей 4А двигатели серии АИ имеют улучшенные энергетические характеристики, лучшие пусковые, акустические и надежность показатели.

Двигатели имеют два исполнения по способу защиты: закрытое IP54 со способом охлаждения IC0141 и защищенное IP23 со способом охлаждения IC23.

По климатическому исполнению двигатели серии АИ могут эксплуатироваться в макроклиматических районах с умеренным (У), тропическим (Т), умеренно холодным (УХЛ) и холодным (ХЛ) климатом в условиях размещения 1, 2, 3 и 4 (см. табл. 2.8). Режим работы двигателей продолжительный S1.

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии АИ:

Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х
1	2	3	4	5	6	7	8	9

- 1 — обозначение серии (АИР или АИС);
- 2 — буква Н, если исполнение защищенное IP23, отсутствие буквы — исполнение закрытое IP54;
- 3 — буква Ф, если ротор фазный; отсутствие буквы — ротор короткозамкнутый;
- 4 — высота оси вращения (две или три цифры);
- 5 — установочный размер по длине станины: S, M или L;

6 — длина сердечника: А — меньшая, В — бóльшая при условии сохранения установочного размера: отсутствие буквы означает, что при данном установочном размере (S, M или L) выполняется только одна длина сердечника;

7 — число полюсов $2p$ (одна или две цифры);

8 — климатическое исполнение (см. табл. 2.7);

9 — категория размещения при эксплуатации (см. табл. 2.8).

Помимо двигателей основного исполнения с короткозамкнутым ротором серия АИ имеет модификации:

двигатели многоскоростные закрытого исполнения;

двигатели с фазным ротором закрытого или защищенного исполнений;

двигатели с повышенным скольжением закрытого исполнения;

двигатели со встроенным электромагнитным тормозом;

двигатели однофазные и др.

По желанию заказчика двигатели могут быть изготовлены со встроенными датчиками температурной защиты.

Ниже приведены технические данные трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии АИР основного исполнения (табл. 6.4), их габаритные и установочно-присоединительные размеры (рис. 6.1 и табл. 6.5) и технические данные многоскоростных асинхронных двигателей серии АИР (табл. 6.6).

Таблица 6.4. Технические данные трехфазных асинхронных двигателей серии АИР основного исполнения

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$S_{ном}$, %	$M_n/M_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	M_{min}/M_n	$I_n/I_{ном}$	J , кг·м ²	Масса, кг
Синхронная частота вращения 3000 об/мин										
АИР50А2	0,09	60	0,75	11,5	2,2	2,2	1,8	4,5	$0,25 \cdot 10^{-4}$	2,5
АИР50В2	0,12	63	0,75	11,5	2,2	2,2	1,8	4,5	$0,28 \cdot 10^{-4}$	2,8
АИР56А2	0,18	68	0,78	9,0	2,2	2,2	1,8	5,0	$4,2 \cdot 10^{-4}$	3,4
АИР56В2	0,25	69	0,79	9,0	2,2	2,2	1,8	5,0	$4,7 \cdot 10^{-4}$	3,9
АИР63А2	0,37	72	0,86	9,0	2,2	2,2	1,8	5,0	$7,6 \cdot 10^{-4}$	4,7
АИР63В2	0,55	75	0,85	9,0	2,2	2,2	1,8	5,0	$9 \cdot 10^{-4}$	5,45
АИР71А2	0,75	78,5	0,83	6,0	2,1	2,2	1,6	6,0	$9,7 \cdot 10^{-4}$	6,5
АИР71В2	1,1	79	0,83	6,5	2,1	2,2	1,6	6,0	$11 \cdot 10^{-4}$	8,8
АИР80А2	1,5	81	0,85	5,0	2,1	2,2	1,6	7,0	$18 \cdot 10^{-4}$	9,8
АИР80В2	2,2	83	0,87	5,0	2,0	2,2	1,6	7,0	$21 \cdot 10^{-4}$	13,2
АИР90L2	3,0	84,5	0,88	5,0	2,0	2,2	1,6	7,0	0,0035	16,7
АИР100S2	4,0	87	0,88	5,0	2,0	2,2	1,6	7,5	0,0059	21,6
АИР100L2	5,5	88	0,89	5,0	2,0	2,2	1,6	7,5	0,0075	27,4
АИР112M2	7,5	87,5	0,88	3,5	2,0	2,2	1,6	7,5	0,01	41
АИР132M2	11	88	0,90	3,0	1,6	2,2	1,2	7,5	0,023	64
АИР160S2	15	90	0,89	3,0	1,8	2,7	1,7	7,0	0,039	100
АИР160M2	18,5	90,5	0,90	3,0	2,0	2,7	1,8	7,0	0,043	110

Продолжение табл. 6.4

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$S_{ном}$, %	$M_n/M_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_{min}/M_{ном}$	$I_n/I_{ном}$	J , кг·м ²	Масса, кг
АИР180S2	22	90,5	0,89	2,7	2,0	2,7	1,9	7,0	0,057	160
АИР180M2	30	91,5	0,90	2,5	2,2	3,0	1,9	7,5	0,07	180
АИР200M2	37	91,5	0,87	2,0	1,6	2,8	1,5	7,0	0,13	220
АИР200S2	45	92	0,88	2,0	1,8	2,8	1,5	7,5	0,14	240
АИР225M2	55	92,5	0,91	2,0	1,8	2,6	1,5	7,5	0,22	320
АИР250S2	75	93	0,90	2,0	1,8	3,0	1,6	7,5	0,41	425
АИР250M2	90	93	0,92	2,0	1,8	3,0	1,6	7,5	0,46	455
Синхронная частота вращения 1500 об/мин										
АИР50A4	0,06	53	0,63	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000029	2,6
АИР50B4	0,09	57	0,65	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000033	2,9
АИР56A4	0,12	63	0,66	10	2,3	2,2	1,8	5,0	0,0007	3,35
АИР56B4	0,18	64	0,68	10	2,3	2,2	1,8	5,0	0,00079	3,9
АИР63A4	0,25	68	0,67	12	2,3	2,2	1,8	5,0	0,0012	4,7
АИР63B4	0,37	68	0,7	12	2,3	2,2	1,8	5,0	0,0014	5,6
АИР71A4	0,55	70,5	0,7	9,5	2,3	2,2	1,8	5,0	0,0013	7,8
АИР71B4	0,75	73	0,76	10	2,2	2,2	1,6	5,0	0,0014	8,8
АИР80A4	1,1	75	0,81	7,0	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0032	9,9
АИР80B4	1,5	78	0,83	7,0	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0033	12,1
АИР90L4	2,2	81	0,83	7,0	2,1	2,2	1,6	6,5	0,0056	17,0
АИР100S4	3,0	82	0,83	6,0	2,0	2,2	1,6	7,0	0,0087	21,6
АИР100L4	4,0	85	0,84	6,0	2,0	2,2	1,6	7,0	0,011	27,3
АИР112M4	5,5	85,5	0,86	4,5	2,0	2,5	1,6	7,0	0,017	41,0
АИР132S4	7,5	87,5	0,86	4,0	2,0	2,5	1,6	7,5	0,028	58
АИР132M4	11	87,5	0,87	3,5	2,0	2,7	1,6	7,5	0,04	70
АИР160S4	15	90	0,89	3,0	1,9	2,9	1,8	7,0	0,078	100
АИР160M4	18,5	90,5	0,89	3,0	1,9	2,9	1,8	7,0	0,1	110
АИР180S4	22	90,5	0,87	2,5	1,7	2,4	1,5	7,0	0,15	170
АИР180M4	30	92	0,87	2,0	1,7	2,7	1,5	7,0	0,19	190
АИР200M4	37	92,5	0,89	2,0	1,7	2,7	1,6	7,5	0,28	245
АИР200S4	45	92,5	0,89	2,0	1,7	2,7	1,6	7,5	0,34	270
АИР225M4	55	93	0,89	2,0	1,7	2,6	1,6	7,0	0,51	335
АИР250S4	75	94	0,88	1,5	1,7	2,5	1,4	7,5	0,89	450
АИР250M4	90	94	0,89	1,5	1,5	2,5	1,3	7,5	1,1	480
АИР280S4	110	93,5	0,91	2,2	1,6	2,2	1,0	6,5	2,3	594
АИР280M4	132	94	0,93	2,2	1,6	2,2	1,0	6,5	2,5	752

Продолжение табл. 6.4

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$ кВт	$\eta_{\text{ном}}$ %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$s_{\text{ном}}$ %	$M_{\text{сг}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{гвх}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{гидр}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Мас- са, кг
АИР315S4	160	93,5	0,91	2,0	1,4	2,0	1,0	5,5	3,1	896
АИР315M4	200	94	0,92	2,0	1,4	2,0	0,9	5,5	3,6	1000
АИР355S4	250	94,5	0,92	2,0	1,4	2,0	0,9	7,0	6,0	1275
АИР355M4	315	94,5	0,92	2,0	1,4	2,0	0,9	7,0	7,0	1480
Синхронная частота вращения 1000 об/мин										
АИР63A6	0,19	56	0,62	14	2,0	2,2	1,6	4,0	0,0018	4,65
АИР63B6	0,25	59	0,62	14	2,0	2,2	1,6	4,0	0,0022	5,6
АИР71A6	0,37	65	0,65	8,5	2,0	2,2	1,6	4,5	0,0017	7,8
АИР71B6	1,1	74	0,74	8,0	2,0	2,2	1,6	4,5	0,0046	13,4
АИР90L6	1,5	76	0,72	7,5	2,0	2,2	1,6	6,0	0,0073	16,9
АИР100L6	2,2	81	0,74	5,5	2,0	2,2	1,6	6,0	0,013	22,8
АИР112MA6	3,0	81	0,76	5,0	2,0	2,2	1,6	6,0	0,017	35,0
АИР112MB6	4,0	82	0,81	5,0	2,0	2,2	1,6	6,0	0,021	40,4
АИР132S6	5,5	85	0,8	4,0	2,0	2,2	1,6	7,0	0,04	57
АИР132M6	7,5	85,5	0,81	4,0	2,0	2,2	1,6	7,0	0,058	68
АИР160S6	11	88	0,83	3,0	2,0	2,7	1,6	6,5	0,12	100
АИР160M6	15	88	0,85	3,0	2,0	2,7	1,6	6,5	0,15	120
АИР180M6	18,5	89,5	0,85	2,0	1,8	2,4	1,6	6,5	0,2	180
АИР200M6	22	90	0,83	2,0	1,6	2,4	1,4	6,5	0,36	225
АИР200L6	30	90	0,85	2,5	1,6	2,4	1,4	6,5	0,4	250
АИР225M6	37	91	0,85	2,0	1,5	2,3	1,4	6,5	0,61	305
АИР250S6	45	92,5	0,85	2,0	1,5	2,3	1,4	6,5	1,0	390
АИР250M6	55	92,5	0,86	2,0	1,5	2,3	1,4	6,5	1,1	430
АИР280S6	75	92,5	0,9	2,2	1,3	2,2	1,0	6,5	2,9	637
АИР280M6	90	93	0,9	2,2	1,4	2,4	1,0	6,5	3,4	702
АИР315S6	110	93	0,92	2,3	1,4	2,3	1,0	6,0	4,0	847
АИР315M6	132	93,5	0,9	2,3	1,4	2,3	1,0	6,5	4,5	950
АИР355S6	160	94	0,9	2,2	1,6	2,0	1,0	7,0	7,3	1136
АИР355M6	200	94,5	0,9	2,2	1,6	2,0	0,9	7,0	8,8	1280
Синхронная частота вращения 750 об/мин										
АИР71B8	0,25	56	0,65	8,0	1,8	1,9	1,4	4,0	0,0019	7,8
АИР80A8	0,37	60	0,61	6,5	1,8	1,9	1,4	4,0	0,0034	13,8
АИР80B8	0,55	64	0,63	6,5	1,8	1,9	1,4	4,0	0,0041	13,5
АИР90LA8	0,75	70	0,66	7,0	1,6	1,7	1,2	3,5	0,0067	19,7
АИР90LB8	1,1	72	0,7	7,0	1,6	1,7	1,2	3,5	0,0086	22,3

Окончание табл. 6.4

Типоразмер	$P_{ном},$ кВт	$\eta_{ном},$ %	$\cos \varphi_{ном}$	$S_{ном},$ %	$M_n/M_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_{min}/M_{ном}$	$I_n/I_{ном}$	$J, \text{ кг} \cdot \text{ м}^2$	Мас- са, кг
АИР100L8	1,5	76	0,73	6,0	1,6	1,7	1,2	5,5	0,013	31,3
АИР112МА8	2,2	76,5	0,71	5,5	1,8	2,2	1,4	6,0	0,017	36
АИР112МВ8	3,0	79	0,74	5,5	1,8	2,2	1,4	6,0	0,025	41
АИР132S8	4,0	83	0,7	4,5	1,8	2,2	1,4	6,0	0,042	56
АИР132М8	5,5	83	0,74	5,0	1,8	2,2	1,4	6,0	0,057	70
АИР160S8	7,5	87	0,75	3,0	1,6	2,4	1,4	5,5	0,12	100
АИР160М8	11	87,5	0,75	3,0	1,6	2,4	1,4	6,0	0,15	120
АИР180М8	15	89	0,82	2,5	1,6	2,2	1,5	5,5	0,23	180
АИР200М8	18,5	89	0,81	2,5	1,6	2,3	1,4	6,0	0,36	225
АИР200L8	22	90	0,81	2,5	1,6	2,3	1,4	6,0	0,4	250
АИР225М8	30	90,5	0,81	2,5	1,4	2,3	1,3	6,0	0,61	305
АИР250S8	37	92,5	0,78	2,0	1,5	2,3	1,4	6,0	1,1	400
АИР250М8	45	92,5	0,79	2,0	1,4	2,2	1,3	6,0	1,2	430
АИР280S8	55	92	0,86	3,0	1,3	2,2	1,0	6,0	3,2	643
АИР280М8	75	93	0,87	3,0	1,4	2,2	1,0	6,0	4,1	735
АИР315S8	90	93	0,85	1,5	1,2	2,2	1,0	6,0	4,9	927
АИР315М8	110	93	0,86	1,5	1,1	2,2	0,9	6,0	5,8	1001
АИР355S8	132	93,5	0,85	2,0	1,2	2,0	0,9	6,5	9,0	1175
АИР355М8	160	93,5	0,85	2,0	1,2	2,0	0,9	6,5	10	1280

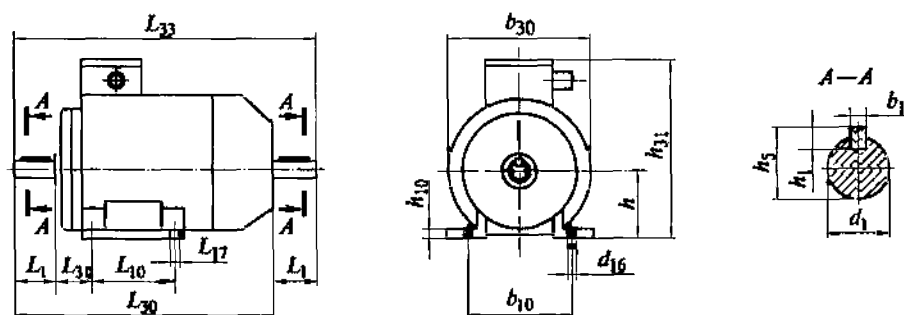


Рис. 6.1. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей серии АИР основного исполнения (табл. 6.5)

Таблица 6.5. Габаритные и установочно-присоединительные размеры трехфазных асинхронных двигателей серии АИР основного исполнения и по способам монтажа IM2081, IM2082 (рис. 6.1)

Условное обозначение размеров	Типоразмер										
	АИР56	АИР63	АИР71	АИР80А	АИР80В АИР80С	АИР90L	АИР100S	АИР100L	АИР112	АИР132S	АИР132М
	Размеры, мм										
L_1	23,0	30,0	40,0	50,0	50,0	50,0	60,0	60,0	80,0	80,0	80,0
L_{10}	71,0	80,0	90,0	100,0	100,0	125,0	112,0	140,0	140,0	140,0	178,0
L_{17}	5,8	7,0	7,0	10,0	10,0	10,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
L_{21}	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	12,0	14,0	14,0	15,0	19,0	19,0
L_{30}	218,0	237,0	272,5	296,5	320,5	337,0	360,0	391,0	433,0	463,0	501,0
L_{31}	36,0	40,0	45,0	50,0	50,0	63,0	63,0	63,0	70,0	89,0	89,0
L_{33}	234,0	263,0	316,5	350,0	374,0	390,0	424,0	455,0	516,0	546,0	584,0
b_1	4,0	5,0	6,0	6,0	6,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
b_{10}	90,0	100,0	112,0	125,0	125,0	140,0	160,0	160,0	190,0	190,0	216,0
b_{16}	8,8	10,0	10,0	12,0	12,0	12,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0
b_{30}	116,0	131,0	163,0	177,0	177,0	200,0	226,0	226,0	250,0	287,0	287,0
h	56,0	63,0	71,0	80,0	80,0	90,0	100,0	100,0	112,0	132,0	132,0
h_1	4,0	5,0	6,0	6,0	6,0	7,0	7,0	7,0	8,0	8,0	8,0
h_5	12,5	16,0	21,5	24,5	24,5	27,0	31,0	31,0	35,0	41,0	41,0
h_{10}	7,0	8,0	8,0	9,0	9,0	10,0	12,0	12,0	14,0	16,0	16,0
h_{31}	148,0	161,0	188,0	204,5	204,5	230,0	246,5	246,5	272,0	311,0	311,0
d_1	11,0	14,0	19,0	22,0	22,0	24,0	28,0	28,0	32,0	38,0	38,0

Таблица 6.6. Технические данные многоскоростных асинхронных двигателей серии АИР

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$I_n/I_{ном}$	$M_n/M_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_{min}/M_{ном}$	Масса, кг
АИР63А4/2	0,190	1380	55,0	0,66	3,5	1,6	1,8	1,0	6,1
	0,265	2640	61,0	0,75	4,0	1,2	1,8	0,8	
АИР63В4/2	0,265	1380	57,0	0,70	3,5	1,6	2,0	1,0	6,9
	0,370	2640	61,0	0,88	4,0	1,2	1,7	0,8	
АИР71А4/2	0,480	1360	69,0	0,82	4,5	1,5	1,9	1,4	8,9
	0,620	2780	68,0	0,85	4,5	1,5	1,9	1,3	

Продолжение табл. 6.6

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$I_n/I_{ном}$	$M_n/M_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_{slip}/M_{ном}$	Масса, кг
АИР71В4/2	0,710	1360	69,0	0,84	4,5	1,75	1,9	1,5	9,7
	0,850	2780	68,0	0,86	4,5	1,85	2,0	1,4	
АИР80А4/2	1,120	1410	74,0	0,78	5,0	1,9	2,2	1,6	13,5
	1,500	2730	73,0	0,85	5,0	1,9	2,0	1,5	
АИР80В4/2	1,500	1380	75,0	0,75	5,0	2,0	2,0	1,6	14,9
	2,000	2720	75,0	0,84	5,0	2,0	2,1	1,6	
АИР90L4/2	2,200	1420	79,0	0,83	6,0	1,9	2,4	1,6	20,8
	2,650	2850	78,0	0,86	6,0	2,0	2,4	1,5	
АИР90L6/4	1,320	950	74,0	0,68	5,0	2,3	2,5	1,5	20,8
	1,600	1420	74,0	0,85	5,5	1,6	2,1	1,2	
АИР90L8/4	0,800	710	62,0	0,60	3,0	1,7	2,0	1,6	20,3
	1,320	1410	75,0	0,86	5,0	1,5	2,0	1,3	
АИР100S4/2	3,000	1420	82,0	0,84	5,5	2,1	2,4	1,6	24,2
	3,750	2790	80,0	0,90	5,5	2,0	2,4	1,6	
АИР100L4/2	4,000	1400	82,0	0,88	5,5	1,9	2,1	1,6	29,2
	4,750	2820	82,0	0,91	6,0	2,2	2,4	1,6	
АИР100S6/4	1,700	940	76,0	0,76	4,5	1,3	1,8	1,3	22,5
	2,240	1400	80,0	0,86	5,5	1,3	1,9	1,2	
АИР100L6/4	2,120	940	77,0	0,73	4,5	1,4	2,0	1,3	27,1
	3,150	1420	80,0	0,86	5,5	1,5	2,1	1,4	
АИР100S8/4	1,000	720	70,0	0,61	4,0	1,2	1,8	1,1	21,5
	1,700	1420	79,0	0,87	5,0	1,1	1,8	1,0	
АИР100L8/4	1,400	720	72,0	0,60	4,0	1,6	2,0	1,5	26,2
	2,360	1420	81,0	0,89	5,5	1,4	1,9	1,0	
АИР100S8/6	1,000	710	72,0	0,64	5,0	1,4	2,0	1,3	22,0
	1,250	970	77,0	0,66	5,5	1,5	2,2	1,0	
АИР100L8/6	1,320	710	71,0	0,66	4,0	1,6	1,9	1,4	26,0
	1,800	960	76,0	0,73	5,0	1,4	2,0	0,9	
АИР100S6/4/2	1,120	940	72,0	0,70	4,0	1,8	2,0	1,8	23,0
	1,250	1440	72,0	0,74	5,0	1,4	2,2	1,4	
	1,600	2860	72,0	0,86	7,0	1,7	2,2	1,2	
АИР100L6/4/2	1,400	910	74,0	0,78	4,5	1,5	1,9	1,4	27,0
	1,500	1460	73,0	0,72	5,0	1,6	2,6	1,4	
	2,120	2880	75,0	0,82	5,0	1,4	2,3	1,4	

Окончание табл. 6.6

Типоразмер	$P_{ном},$ кВт	$n_{ном},$ об/мин	$\eta_{ном},$ %	$\cos \varphi_{ном}$	$I_n/I_{ном}$	$M_n/M_{ном}$	$M_{пик}/M_{ном}$	$M_{пл}/M_{ном}$	Масса, кг
АИР100S8/4/2	0,630	720	64,0	0,63	3,5	1,5	2,2	1,2	23,5
	1,320	1460	76,0	0,80	5,5	1,4	2,4	1,0	
	1,700	2900	75,0	0,90	6,0	1,2	2,2	0,7	
АИР100L8/4/2	0,900	710	63,0	0,65	4,0	1,2	1,9	1,2	28,2
	1,500	1460	78,0	0,81	6,0	1,3	2,4	1,1	
	2,100	2880	77,0	0,94	6,0	1,2	2,3	0,8	
АИР100S8/6/4	0,560	710	54,0	0,48	3,5	1,2	2,3	1,2	23,0
	1,120	940	65,0	0,67	4,5	1,1	1,8	0,8	
	2,800	1410	78,0	0,70	6,0	2,6	3,1	2,5	
АИР100L8/6/4	0,710	700	57,0	0,52	3,4	1,8	2,2	1,7	27,5
	1,200	940	68,0	0,61	4,5	1,7	2,0	1,4	
	3,000	1430	79,0	0,66	7,5	4,0	3,8	3,7	

6.3. Двигатели трехфазные асинхронные серии АОЗ

Асинхронные двигатели этой серии изготавливаются с высотами оси вращения 315, 355 и 400 мм и предназначены для привода различных механизмов общего назначения.

Двигатели изготавливаются на напряжения 220/380 и 380/660 В (с шестью выводами обмотки статора) на частоту тока 50 и 60 Гц. Степень защиты

двигателей IP44 и способ охлаждения IC0141; номинальный режим работы продолжительный S1. При частоте тока 60 Гц синхронная частота вращения составляет 120 % по сравнению с частотой вращения при 50 Гц.

Двигатели имеют климатическое исполнение У при категории размещения 3 (см. 2.5). Технические данные двигателей приведены в табл. 6.7, а габаритные, установочно-присоединительные размеры — в табл. 6.8.

Таблица 6.7. Технические данные асинхронных двигателей серии АОЗ

Типоразмер	$P_{ном},$ кВт	$U_i, В$	$S_{ном},$ %	$n_1,$ об/мин	$\eta_{ном},$ %	$\cos \varphi_{ном}$	$M_{пик}/M_{ном}$	$M_n/M_{ном}$	$I_n/I_{ном}$
АОЗ-315S-2УЗ	160	380/660	1,2	3000	92,0	0,9	2,0	1,0	7,0
АОЗ-315М-2УЗ	200	380/660	1,2	3000	92,5	0,9	2,0	1,0	7,0
АОЗ-315S-4УЗ	160	380/660	1,4	1500	93,5	0,92	2,3	1,3	7,0
АОЗ-315М-4УЗ	200	380/660	1,4	1500	94,0	0,92	2,3	1,3	7,0
АОЗ-315S-6УЗ	110	220/380	1,7	1000	93,0	0,9	2,3	1,4	7,0
АОЗ-315М-6УЗ	132	380/660	1,7	1000	93,5	0,9	2,6	1,6	7,0
АОЗ-315S-8УЗ	90	220/380	1,7	750	92,5	0,85	2,6	1,6	6,3

Продолжение табл. 6.7

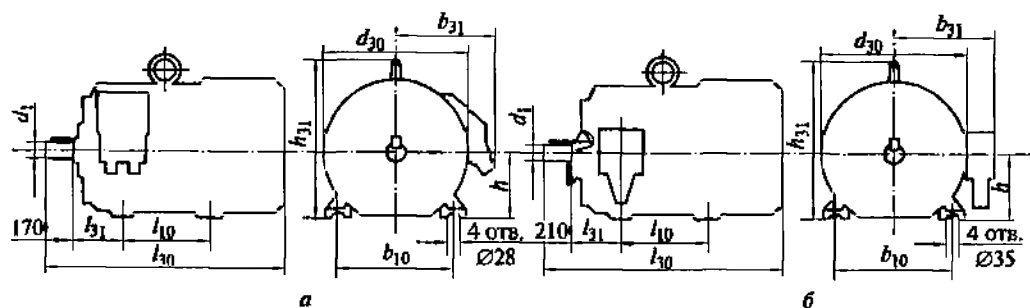
Типоразмер	$P_{ном},$ кВт	$U_1, В$	$\eta_{ном},$ %	$n_1,$ об/мин	$\eta_{ном},$ %	$\cos \varphi_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_p/M_{ном}$	$I_p/I_{ном}$
АО3-315М-8У3	110	220/380	1,7	750	93,0	0,85	2,6	1,6	6,3
АО3-315S-10У3	55	220/380	1,9	600	92,0	0,79	2,0	1,3	6,0
АО3-315М-10У3	75	220/380	1,9	600	92,0	0,8	2,0	1,3	6,0
АО3-315S-12У3	45	220/380	2,0	500	90,5	0,76	1,8	1,0	6,0
АО3-355S-4У3	250	380/660	1,3	1500	94,5	0,92	2,0	1,0	7,0
АО3-355М-4У3	315	380/660	1,3	1500	94,5	0,93	2,0	1,0	7,0
АО3-355S-6У3	160	380/660	1,5	1000	93,5	0,90	2,4	1,2	7,0
АО3-355М-6У3	200	380/660	1,5	1000	94,0	0,90	2,4	1,2	7,0
АО3-355S-8У3	132	380/660	1,5	750	93,5	0,85	2,2	1,2	6,0
АО3-355М-8У3	160	380/660	1,5	750	93,5	0,86	2,2	1,2	6,0
АО3-355S-10У3	90	220/380	1,8	600	92,5	0,83	1,8	1,0	6,0
АО3-355М-10У3	110	220/380	1,8	600	93,0	0,83	1,8	1,0	6,0
АО3-355S-12У3	75	220/380	2,0	500	91,5	0,77	1,8	1,0	6,0
АО3-355М-12У3	90	220/380	2,0	500	92,0	0,77	1,8	1,0	6,0
АО3-400М-4У3	400	380/660	1,2	1500	95,0	0,91	2,0	0,9	7,0
АО3-315S-2У3эк.	160	380/660	1,2	3000	92,0	0,9	2,0	0,9	7,0
АО3-315М-2У3эк.	200	380/660	1,2	3000	92,5	0,9	2,0	0,9	7,0
АО3-315S-4У3эк.	160	380/660	1,4	1500	93,5	0,92	2,3	1,3	7,0
АО3-315М-4У3эк.	200	380/660	1,4	1500	94,0	0,92	2,3	1,3	7,0
АО3-315S-6У3эк.	110	220/380	1,7	1000	93,0	0,9	2,3	1,4	7,0
АО3-315М-6У3эк.	132	380/660	1,7	1000	93,5	0,9	2,6	1,6	7,0
АО3-315S-8У3эк.	90	220/380	1,7	750	92,5	0,85	2,6	1,6	6,3
АО3-315М-8У3эк.	110	220/380	1,7	750	93,0	0,85	2,6	1,6	6,3
АО3-315S-10У3эк.	55	220/380	1,9	600	92,0	0,79	2,0	1,3	6,0
АО3-315М-10У3эк.	75	220/380	1,9	600	92,0	0,8	2,0	1,3	6,0
АО3-315S-12У3эк.	45	220/380	2,0	500	90,5	0,76	1,8	0,9	6,0
АО3-315М-12У3эк.	55	220/380	2,0	500	91,0	0,77	1,8	0,9	6,0
АО3-355S-4У3эк.	250	380/660	1,3	1500	94,5	0,92	2,0	0,9	7,0
АО3-355М-4У3эк.	315	380/660	1,3	1500	94,5	0,93	2,0	0,9	7,0
АО3-355S-8У3эк.	132	380/660	1,5	750	93,5	0,85	2,2	1,2	6,0
АО3-355М-8У3эк.	160	380/660	1,5	750	93,5	0,86	2,2	1,2	6,0
АО3-355S-10У3эк.	90	220/380	1,8	600	92,5	0,83	1,8	1,0	6,0
АО3-355М-10У3эк.	110	220/380	1,8	600	93,0	0,83	1,8	1,0	6,0
АО3-355S-12У3эк.	75	220/380	2,0	500	91,5	0,77	1,8	0,9	6,0

Окончание табл. 6.7

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	U_1 , В	$\Delta_{ном}$, %	n_1 , об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_n/M_{ном}$	$I_n/I_{ном}$
АО3-355М-12У3эк.	90	220/380	2,0	500	92,0	0,77	1,8	0,9	6,0
АО3-400М-4У3эк.	400	380/660	1,2	1500	95,0	0,91	2,0	0,9	7,0

Примечание. Типоразмеры, отмеченные «эк», имеют экспортное исполнение.

Таблица 6.8. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей серии АО3 исполнения по способу монтажа IM 1001



Типоразмер	l_{10}	l_{30}	l_{31}	d_1	d_{30}	b_{10}	b_{31}	h	h_{31}	Масса, кг
АО3-315S-2У3	406	1243								1054
АО3-315М-2У3	457	1294								1178
АО3-315S-4У3	406	1243								1065
АО3-315М-4У3	457	1294								1195
АО3-315S-6У3	406	1243								1020
АО3-315М-6У3	457	1294								1120
АО3-315S-8У3	406	1243	216	80	690	508	544	315	765	1050
АО3-315М-8У3	457	1294								1110
АО3-315S-10У3	406	1243								988
АО3-315М-10У3	457	1268,5								1125
АО3-315S-12У3	406	1243								988
АО3-315М-12У3	457	1268,5								1125
АО3-355S-4У3	500	1350								1455
АО3-355М-4У3	560	1410								1675
АО3-355S-6У3	500	1350	254	90	780	610	570	355	852	1345
АО3-355М-6У3	560	1410								1515
АО3-355S-8У3	500	1350								1380

Окончание табл. 6.8

Типоразмер	h_0	b_0	b_1	d_1	d_{30}	b_{10}	b_{31}	h	h_{31}	Масса, кг
АО3-355М-8У3	560	1410								1515
АО3-355S-10У3	500	1350								1415
АО3-355М-10У3	560	1410	254	90	780	610	570	355	852	1500
АО3-355S-12У3	500	1350								1415
АО3-355М-12У3	560	1410								1500
АО3-400М-4У3	630	1545	280	100	880	686	645	400	955	2220

Примечание. Двигатели АО3-315, АО3-355 — рис. а; АО3-400 — рис. б.

6.4. Двигатели трехфазные асинхронные серии 5А

Двигатели серии 5А с короткозамкнутым ротором выпускаются в закрытом IP44 и защищенном IP23 исполнениях (5А и 5АН соответственно), а с фазным ротором — в закрытом IP23

7 — климатическое исполнение и категория размещения при эксплуатации по ГОСТ 15150 — 69 (У2, У3, Т2, ХЛ2).

Условия эксплуатации: высота над уровнем моря не более 4500 м, при этом высоте более 1000 м соответствует снижение отдаваемой мощности до значений:

Высота над уровнем моря, м	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
Отдаваемая мощность по отношению к номинальной, %	100	98	95	93	88	84	80	74

исполнении (5АНК). Двигатели серии 5А полностью взаимозаменяемы с соответствующими типоразмерами серии 4А основного исполнения.

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии 5А:

5А X X X X X X
1 2 3 4 5 6 7

- 1 — обозначение серии;
- 2 — либо отсутствует, либо буква М — модернизированный;
- 3 — высота оси вращения (две или три цифры);
- 4 — установочный размер по длине статорины (S или L);
- 5 — длина сердечника статора (А — первая, В — вторая, С — третья);
- 6 — число полюсов $2p$ (одна или две цифры);

При эксплуатации двигателей климатического исполнения Т2 при температуре окружающей среды 50 °С их номинальная мощность снижается на 10 %.

Двигатели могут быть использованы в номинальных режимах S1 — S6. Они рассчитаны на частоту переменного тока 50 Гц, но по желанию заказчика могут быть изготовлены на частоту 60 Гц.

Двигатели изготавливают на напряжения 220/380 и 380/660 В. Двигатели на частоту тока 60 Гц имеют синхронную частоту вращения на 20 % выше, чем при частоте 50 Гц. Технические данные двигателей приведены в табл. 6.9 и 6.10.

Таблица 6.9. Технические данные трехфазных асинхронных двигателей серии 5А с короткозамкнутым ротором закрытого исполнения IP44

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	Масса, кг
5AM315M2	200,0	2960	95,6	0,93	1110
5AM315S2	160,0	2960	95,0	0,92	970
5AM280M2	132,0	2960	94,7	0,93	770
5AM280S2	110,0	2960	94,3	0,93	720
5AM250M2	90,0	2940	93,0	0,92	505
5AM250S2	75,0	2940	93,0	0,91	475
5A225M2	55,0	2940	93,5	0,91	340
5A200L2	45,0	2940	93,4	0,90	255
5A200M2	37,0	2940	93,0	0,90	235
5A160M2	18,5	2925	91,0	0,90	138
5A160S2	15,0	2925	90,5	0,89	126
5A80MB2	2,2	2850	82,5	0,86	15,5
5A80MA2	1,5	2850	81,5	0,84	14,0
5AM315M4	200,0	1480	96,0	0,89	1150
5AM315S4	160,0	1480	96,0	0,89	1110
5AM280M4	132,0	1480	95,5	0,88	885
5AM280S4	110,0	1480	95,3	0,87	780
5AM250M4	90,0	1478	94,0	0,88	515
5AM250S4	75,0	1478	94,0	0,87	480
5A225M4	55,0	1470	93,3	0,85	345
5A200L4	45,0	1465	92,5	0,85	270
5A200M4	37,0	1465	92,0	0,86	245
5A160M4	18,5	1455	90,0	0,86	140
5A160S4	15,0	1450	89,0	0,86	127
5A80MB4	1,5	1410	77,0	0,82	14,7
5A80MA4	1,1	1410	75,0	0,80	13,0
5AM315M6	132,0	985	95,0	0,88	1010
5AM315S6	110,0	985	95,0	0,88	960
5AM280M6	90,0	985	94,5	0,86	780
5AM280S6	75,0	985	94,5	0,86	745
5AM250M6	55,0	980	92,5	0,85	450
5AM250S6	45,0	980	92,5	0,83	430
5A225M6	37,0	980	91,0	0,83	330
5A200L6	30,0	978	90,0	0,84	245

Окончание табл. 6.9

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	Масса, кг
5A200M6	15,0	970	88,5	0,84	150
5A160S6	11,0	970	88,5	0,83	124
5A80MB6	1,1	930	73,0	0,72	16,0
5A80MA6	0,75	930	71,0	0,70	14 0
5AM315M8	110,0	740	94,0	0,84	1025
5AM315S8	90,0	740	94,5	0,84	965
5AM280M8	75,0	740	93,9	0,84	790
5AM280S8	55,0	740	93,8	0,85	725
5AM250M8	45,0	735	92,5	0,76	460
5AM250S8	37,0	735	92,0	0,75	430
5A225M8	30,0	735	90,5	0,79	340
5A200L8	22,0	735	90,0	0,80	260
5A200M8	18,5	735	89,8	0,79	240
5A160M8	11,0	725	87,5	0,75	149
5A160S8	7,5	725	87,0	0,75	123
5A80MB8	0,55	700	61,0	0,64	15,7

Таблица 6.10. Технические данные трехфазных асинхронных двигателей серии 5A с короткозамкнутым ротором исполнения по степени защиты 5АН

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	Масса, кг
5АН250M2	132	2940	94,0	0,90	500
5АН250S2	110	2940	93,5	0,88	455
5АН225M2	90	2950	94,0	0,92	322
5АН200L2	75	2940	93,0	0,88	270
5АН200M2	55	2940	93,0	0,88	240
5АН250M4	110	1470	94,0	0,85	510
5АН250S4	90	1470	94,0	0,85	455
5АН225M4	90	1475	93,0	0,85	314
5АН200L4	55	1470	92,5	0,88	280
5АН200M4	45	1470	92,5	0,87	250
5АН250M6	75	985	93,0	0,82	480
5АН250S6	55	985	95,5	0,82	410
5АН225M6	45	980	91,8	0,84	303
5АН200L6	37	980	91,0	0,81	255
5АН200M6	30	980	90,5	0,81	230

Окончание табл. 6.10

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	Масса, кг
5АН250М8	55	740	92,0	0,75	475
5АН250S8	45	740	91,0	0,75	410
5АН225М8	37	735	90,4	0,80	315
5АН200L8	30	735	90,5	0,82	270
5АН200М8	22	735	90,5	0,82	240

Двигатели имеют класс нагревостойкости изоляции В или F (при высоте оси вращения 200 мм и более).

6.5. Серия трехфазных асинхронных двигателей общего назначения ВЭМЗ

Серия трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором общего назначения ВЭМЗ (Владимирский электромоторный завод) [4] содержит типоразмеры двигателей базовых серий 4АМ, АИР, 5А, 6А, модернизированные в соответствии с современным уровнем технологии и требованиями действующих стандартов.

Серия ВЭМЗ включает трехфазные асинхронные двигатели:

основного исполнения со степенью защиты IP54 односкоростные;

модификации: а) многоскоростные (двух-, трех- и четырехскоростные); б) двигатели с повышенным скольжением для привода механизмов с переменной нагрузкой, большим моментом инерции вращающихся частей механизмов и с большой частотой пусков; в) двигатели со степенью защиты IP23 повышенной мощности; г) однофазные асинхронные двигатели; д) двигатели со степенью защиты IP55 с привязкой рядов мощностей и установочных размеров в соответствии с нормами CENELEK Dokument 28/54.

Структура обозначения типоразмеров двигателей ВЭМЗ:

$\begin{matrix} \text{X} & \text{X} & \text{X} & \text{X} & \text{X} & \text{X} & \text{X} & \text{X} & \text{X} \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \end{matrix}$

1 — обозначение базовой серии (4АМ, АИР, 5А или 6А);

2 — признак модификации с повышенным скольжением (С);

3 — габарит (высота оси вращения, мм);

4 — установочный размер по длине статорной (S, M, L);

5 — вариант длины сердечника (А, В);

6 — число полюсов $2p$;

7 — двигатели с повышенным КПД имеют в обозначении букву «е»;

8 — климатическое исполнение и категория размещения;

9 — некоторые типоразмеры двигателей по нормам CENELEK обозначены буквой К.

Двигатели изготавливают на номинальные напряжения: 220/380 В, 380/660 В, 600 В (соединение обмотки статора «звездой»), 400 В (соединение обмотки статора «треугольником»). По заказу потребителей двигатели могут быть изготовлены и на другие номинальные напряжения.

Односкоростные двигатели на номинальное напряжение 220/380 В на частоту 50 Гц без изменения мощности допускают работу от сети 60 Гц при напряжении 240/415 В.

Двигатели могут стабильно работать при отклонении напряжения питания

на $\pm 10\%$ или отклонении частоты от $+3$ до -5% или одновременном отклонении напряжения и частоты от номинальных значений.

Двигатели имеют исполнения для эксплуатации в макроклиматических районах с умеренным (У), тропическим (Т), умеренно холодным (УХЛ) и холодным (ХЛ) климатом при категориях размещения 1, 2, 3, 4 (см. 2.5).

В соответствии с ГОСТ Р 51689—2000 двигатели основного исполнения могут иметь *сервис-фактор*, равный 1,1 или 1,15, т.е. допускать длительную перегрузку на 10 и 15 % соответственно при номинальных напряжениях и частоте. При этом температура обмоток двигателей превысит допустимое значение не более чем на 10 %.

При длительной работе двигателей при температуре окружающей среды, превышающей допустимую, и при высоте над уровнем моря свыше 1000 м, отдаваемая двигателем мощность должна быть снижена до значений, приведенных в табл. 2.10 и 2.11.

Двигатели, имеющие сервис-фактор 1,15, допускают длительную эксплуатацию при номинальной мощности и номинальном напряжении при температуре окружающей среды до $+50^\circ\text{C}$. В соответствии с ГОСТ 28173—89 двигатели выдерживают 1,5-кратную перегрузку по току в течение 2 мин. Двигатели со степенью защиты IP23 могут работать в средах с содержанием пыли до 2 мг/м^3 , двигатели со степенью защиты IP44 — до 10 мг/м^3 . При большей концентрации пыли следует применять двигатели со степенью защиты IP54.

В соответствии с ГОСТ Р 51677—2000 асинхронные двигатели по уровню коэффициента полезного действия подразделяют на двигатели с нормальным КПД и двигатели с повышенным

КПД. Суммарные потери двигателей с повышенным КПД примерно на 20 % меньше, чем двигателей с нормальным КПД. Двигатели с повышенным КПД дополнительно маркируются строчной буквой «е», например 5АМ280М4еУ2.

В табл. 6.11 и 6.12 приведены значения коэффициента полезного действия и коэффициента мощности при различных нагрузках. Приведенные в этих таблицах данные упрощают расчеты параметров двигателей в ненормальных режимах, необходимые для получения механических и рабочих характеристик выбираемого двигателя.

Номинальные и пусковые параметры двигателей (кратности пускового тока и пускового момента), приводимые в табл. 6.14—6.24, соответствуют номинальному напряжению питания 380 В. При изменениях напряжения указанные кратности меняются, при этом кратность пускового тока пропорциональна напряжению питания в первой степени, а кратность пускового момента пропорциональна напряжению во второй степени.

По заказу потребителя двигатели могут быть укомплектованы температурными датчиками. Датчики встраивают в лобовые части обмотки статора со стороны, противоположной вентилятору наружного обдува, по одному в каждую фазу, соединяют последовательно, концы цепи датчиков выводят на специальные клеммы, расположенные в коробке выводов. К этим клеммам подключают реле или иной аппарат, реагирующий на сигнал датчиков. Применяемая система обеспечивает защиту двигателя как в режимах с медленным нагреванием (перегрузка или работа на двух фазах), так и в режимах с быстрым нагреванием (заклинивание ротора, выход из строя подшипников и т.п.).

Таблица 6.11. Значения КПД асинхронных двигателей в номинальных режимах работы

Значения коэффициента мощности при нагрузках, %				Значения коэффициента мощности при нагрузках, %			
50	75	100	125	50	75	100	125
94,5	96,0	96,0	95,0	71,0	74,5	75,0	73,5
93,5	95,0	95,0	94,0	70,0	73,5	74,0	72,5
93,0	94,0	94,0	93,0	67,5	72,5	73,0	71,5
92,5	93,0	93,0	92,0	66,0	71,5	72,0	70,5
92,0	92,5	92,0	91,0	65,0	70,5	71,0	69,5
91,0	91,5	91,0	90,0	64,5	69,5	70,0	68,5
89,0	90,0	90,0	89,0	63,5	68,5	69,0	67,5
88,0	89,0	89,0	88,0	63,0	67,5	68,0	66,0
87,0	88,0	88,0	87,0	62,0	66,5	67,0	65,0
86,5	87,5	87,0	86,0	61,0	65,0	66,0	64,0
85,5	86,5	86,0	85,0	60,0	64,0	65,0	63,0
83,5	85,5	85,0	84,0	59,0	63,0	64,0	62,0
82,5	84,5	84,0	83,0	57,0	62,0	63,0	61,0
81,5	83,0	83,0	81,5	56,0	60,5	62,0	60,5
80,5	82,0	82,0	80,5	55,0	59,5	61,0	59,5
79,0	81,0	81,0	79,0	53,5	58,5	60,0	58,5
78,0	80,0	80,0	78,0	51,5	57,5	59,0	58,0
77,0	79,0	79,0	76,5	50,0	56,5	58,0	57,0
76,0	78,0	78,0	75,5	49,0	55,0	57,0	56,0
75,0	77,0	77,0	75,0	46,0	53,0	56,0	55,0
73,5	75,5	76,0	74,5	45,0	52,0	55,0	53,0

Таблица 6.12. Значения коэффициента мощности асинхронных двигателей в номинальных режимах работы

Значения коэффициента мощности при нагрузках, %				Значения коэффициента мощности при нагрузках, %			
50	75	100	125	50	75	100	125
0,88	0,90	0,92	0,92	0,66	0,71	0,81	0,82
0,87	0,89	0,91	0,91	0,65	0,73	0,80	0,81
0,84	0,88	0,90	0,90	0,62	0,74	0,79	0,80
0,80	0,86	0,89	0,89	0,60	0,72	0,78	0,80
0,78	0,85	0,88	0,89	0,58	0,70	0,77	0,80
0,76	0,83	0,87	0,88	0,57	0,69	0,76	0,80

Окончание табл. 6.12

Значения коэффициента мощности при нагрузках, %				Значения коэффициента мощности при нагрузках, %			
50	75	100	125	50	75	100	125
0,74	0,82	0,86	0,87	0,56	0,69	0,75	0,80
0,73	6,81	0,85	0,86	0,54	0,67	0,73	0,78
0,71	0,80	0,84	0,86	0,52	0,65	0,72	0,77
0,70	0,79	0,83	0,84	0,49	0,63	0,71	0,77
0,68	0,78	0,82	0,83	0,47	0,61	0,70	0,76

Помимо основного исполнения серия ВЭМЗ включает модификации:

1. Многоскоростные двигатели. На базе двигателей основного исполнения выпускают двух-, трех- и четырехскоростные полюсно-переключаемые дви-

гатели с соотношением чисел полюсов $2p$: 4/2; 6/4; 8/4; 8/6; 12/6; 6/4/2; 8/4/2; 8/6/4; 12/8/6/4.

2. Двигатели с повышенным скольжением. Двигатели предназначены для привода механизмов с высоким мо-

Таблица 6.13. Конструктивное исполнение двигателей в зависимости от высоты оси вращения

Исполнение по способу монтажа	Обозначение	Диапазон применения по высоте оси вращения, мм	Исполнение по способу монтажа	Обозначение	Диапазон применения по высоте оси вращения, мм	Исполнение по способу монтажа	Обозначение	Диапазон применения по высоте оси вращения, мм
IM1001		80—315	IM2001		80—315	IM3001		80—180
IM1011		80—250	IM2011		80—250	IM3011		80—250
IM1031		80—250	IM2031		80—250	IM3031		80—250
IM1051		80—250	IM2101		80	IM3601		80
IM1061		80—250	IM2111		80	IM3611		80
IM1081		80—250	IM2131		80	IM3631		80

ментом инерции, с неравномерной пульсирующей нагрузкой и механизмов с частыми пусками. Основные режимы работы двигателей S1, S3 и S4. Двигатели отличаются от двигателей основного исполнения обмоткой короткозамкнутого ротора, выполненной из сплава повышенного сопротивления.

3. Двигатели с привязкой рядов мощности и установочных размеров в соответствии с нормами CENELEK, Dokument 28/64. Конструкция двигателей базируется на основе элементов двигателей основного исполнения трехфазных односкоростных и многоскоростных. Двигатели имеют привязку рядов мощности и установочных размеров в соответствии с Европейскими норма-

ми CENELEK, Document 28/64 и ГОСТ Р 51689—2000 (вариант II). По величине коэффициента полезного действия двух- и четырехполюсные двигатели мощностью от 1,1 до 90 кВт соответствуют повышенным значениям КПД.

Изоляционная система двигателей имеет класс нагревостойкости F (предельно допустимая температура 155 °С).

Конструктивное исполнение по способу монтажа двигателей рассматриваемой серии зависит от высоты оси вращения (габарита) двигателя (табл. 6.13).

Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей приведены в табл. 6.25 и рис. 6.2.

Таблица 6.14. Технические данные двигателей основного исполнения по степени защиты IP54, класса нагревостойкости изоляции F

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$I_{1ном}$, А	$M_{ном}$, Н·м	$M_2/M_{1ном}$	$I_{2н}/I_{1ном}$	$M_{пуск}/M_{ном}$	J , кг·м ²	Масса, кг	Сервис-фактор
5A80MA2	1,5	2850	80,0	0,84	3,4	5,0	2,4	6,5	2,5	0,0018	14,0	1,15
5A80MB2	2,2	2850	81,0	0,85	4,9	7,4	2,7	6,5	2,8	0,0021	15,5	1,15
5AM112M2	7,5	2895	87,5	0,89	14,6	24,7	2,9	7,5	3,3	0,0131	56,5	1,15
АИРМ132М2	11,0	2915	88,5	0,9	21,0	36,0	2,5	8,0	3,3	0,024	77,5	1,15
5A160S2	15,0	2920	90,0	0,89	28,5	49,0	2,2	6,8	3,0	0,039	122	1,15
5A160M2	18,5	2920	90,5	0,89	34,9	60,5	2,2	7,0	3,0	0,045	133	1,15
АИР180S2	22,0	2930	90,5	0,89	41,5	72,0	2,0	6,8	2,9	0,063	160	1,15
АИР180М2	30,0	2940	91,5	0,89	56,3	97,0	2,4	8,0	3,3	0,076	180	1,10
5A200M2	37,0	2940	93,0	0,90	67,0	120	2,3	7,4	3,0	0,13	235	1,15
5A200L2	45,0	2940	93,4	0,90	81,5	146	2,4	7,4	3,0	0,15	255	1,10
5A225M2	55,0	2950	93,4	0,91	98,5	178	2,3	7,5	2,8	0,21	340	1,10
5AM250S2	75,0	2960	93,6	0,92	133	242	2,0	7,5	3,0	0,47	475	1,15
5AM250M2	90,0	2955	93,5	0,93	157	290	1,8	7,0	2,7	0,52	505	1,15
5AM280S2	110	2965	93,5	0,92	195	354	1,6	6,5	2,3	0,85	685	1,10
5AM280M2	132	2965	94,5	0,92	232	425	1,8	7,2	2,5	1,02	770	—

Продолжение табл. 6.14

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_p/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пав}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг	Сервис-фактор
5AM315S2	160	2965	94,0	0,93	282	515	1,7	7,0	2,5	1,42	970	1,10
5AM315MA2	200	2970	95,0	0,93	345	643	1,8	8,0	2,7	1,78	1110	1,10
5AM315MB2	250	2975	95,7	0,93	427	802	2,0	8,5	2,7	2,05	1190	—
5A80MA4	1,1	1410	73,0	0,79	2,9	7,5	2,0	4,8	2,3	0,0034	13,0	1,15
5A80MB4	1,5	1410	75,0	0,81	3,8	10,0	1,9	5,5	2,2	0,0036	14,7	1,15
5AM112M4	5,5	1410	86,0	0,83	11,7	36,5	2,5	6,7	2,9	0,02	56,5	1,15
АИРМ132S4	7,5	1450	87,5	0,85	15,4	49,4	2,1	7,0	2,8	0,032	70,0	1,15
АИРМ132M4	11,0	1455	89,0	0,85	22,1	72,2	2,2	7,3	3,0	0,045	83,5	1,15
5A160S4	15,0	1450	89,5	0,86	29,6	99,0	2,2	6,1	2,6	0,075	127	1,15
5A160M4	18,5	1450	90,0	0,86	36,3	122	2,2	6,5	2,6	0,087	140	1,15
АИР180S4	22,0	1465	90,5	0,84	44,0	143	1,7	6,8	2,6	0,16	170	1,10
АИР180M4	30,0	1470	91,5	0,87	57,5	195	1,7	7,0	2,6	0,20	190	1,10
5A200M4	37,0	1470	92,0	0,85	72,0	240	2,4	6,7	2,5	0,27	245	1,15
5A200L4	45,0	1470	92,5	0,85	87,0	292	2,8	7,1	2,8	0,32	270	1,10
5A225M4	55,0	1475	93,0	0,86	105	356	2,2	6,5	2,2	0,50	345	1,10
5AM250S4	75,0	1485	94,3	0,85	142	482	2,2	7,2	2,3	1,00	480	1,15
5AM250M4	90,0	1485	95,0	0,88	164	578	2,2	7,3	2,3	1,20	515	1,15
5AM280S4e	110	1485	95,1	0,87	202	707	2,1	6,4	2,0	2,19	742	1,15
5AM280M4e	132	1485	95,8	0,88	238	848	2,3	7,5	2,2	2,70	885	1,15
5AM315S4e	160	1485	95,3	0,89	287	1028	1,9	6,2	2,2	3,57	1057	1,10
5AM315M4e	200	1485	95,6	0,89	358	1285	1,9	6,5	2,0	3,97	1150	—
5A80MA6	0,75	930	70,0	0,68	2,4	7,7	2,0	4,5	2,3	0,0033	14,0	1,15
5A80MB6	1,1	930	71,0	0,69	3,4	11,3	2,0	4,5	2,3	0,0048	16,0	1,15
5AM112MA6	3,0	950	81,0	0,80	7,2	30,0	2,3	5,5	2,6	0,024	50,5	1,15
5AM112MB6	4,0	955	82,0	0,81	9,2	40,0	2,3	5,5	2,6	0,029	55,0	1,15
АИРМ132S6	5,5	960	84,5	0,80	12,4	54,7	2,0	5,8	2,5	0,048	68,5	1,15
АИРМ132M6	7,5	960	85,5	0,80	16,7	74,6	2,2	6,3	2,8	0,06	81,5	1,15
5A160S6	11,0	970	87,0	0,82	23,4	108	1,9	6,5	2,5	0,11	122	1,15
5A160M6	15,0	970	88,5	0,83	31,0	148	2,0	6,8	2,7	0,15	150	1,15
АИР180M6	18,5	980	89,5	0,84	37,5	180	1,9	6,5	2,7	0,27	180	1,15
5A200M6	22,0	975	90,5	0,83	44,5	215	2,2	6,0	2,2	0,41	245	1,15
5A200L6	30,0	975	90,5	0,84	60,0	294	2,4	6,0	2,2	0,46	280	1,10

Продолжение табл. 6.14

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$, А	$M_{\text{ном}}$, Н · м	$M_{\text{из}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{из}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{маз}}/M_{\text{ном}}$	J , кг · м ²	Масса, кг	Сервис-фактор
5A225M6	37,0	980	91,5	0,84	73,0	360	2,3	6,2	2,5	0,65	330	1,15
5AM250S6	45,0	985	93,0	0,84	87,5	436	2,0	6,2	2,0	1,20	430	1,15
5AM250M6	55,0	985	92,5	0,84	108	533	2,0	6,2	2,0	1,30	450	—
5AM280S6e	75,0	990	94,5	0,85	142	723	1,9	6,2	2,0	3,04	720	1,15
5AM280M6e	90,0	990	94,5	0,85	171	868	1,9	6,2	2,2	3,25	780	1,15
5AM315S6e	110	990	94,8	0,88	201	1060	1,8	6,9	2,6	4,54	913	1,15
5AM315MA6e	132	990	95,0	0,90	235	1273	1,6	6,6	2,4	5,13	1010	1,15
5AM315MB6e	160	990	95,1	0,89	271	1543	2,0	7,5	2,4	5,88	1140	—
5A80MA8	0,37	695	56,0	0,62	1,6	5,1	2,0	3,5	2,2	0,0036	13,5	1,15
5A80MB8	0,55	700	58,0	0,60	2,4	7,5	2,0	3,5	2,2	0,004	15,7	1,15
5AM112MA8	2,2	710	79,0	0,70	6,0	29	2,0	4,6	2,5	0,024	50,0	1,15
5AM112MB8	3,0	710	79,0	0,70	8,3	40	2,0	4,8	2,5	0,029	54,5	1,15
АИРМ132S8	4,0	715	82,0	0,70	10,6	53,4	2,0	4,8	2,5	0,053	68,5	1,15
АИРМ132M8	5,5	715	83,0	0,73	13,8	73,4	2,0	5,3	2,5	0,074	82,0	1,15
5A160S8	7,5	725	86,0	0,72	18,4	99	1,6	5,0	2,2	0,11	120	1,15
5A160M8	11,0	725	87,0	0,74	26,0	145	1,6	5,0	2,2	0,15	145	1,15
АИР180M8	15,0	730	88,0	0,78	33,0	196	1,6	5,3	2,2	0,27	180	1,10
5A200M8	18,5	735	90,0	0,76	41,0	240	2,0	6,4	2,7	0,41	240	1,15
5A200L8	22,0	735	90,0	0,77	48,5	286	2,0	6,2	2,6	0,46	260	1,10
5A225M8	30,0	735	91,0	0,78	64,5	389	2,1	5,5	2,2	0,70	340	1,15
5AM250S8	37,0	740	92,0	0,73	81,5	477	1,8	6,5	2,6	1,20	430	1,15
5AM250M8	45,0	740	93,0	0,75	98,0	580	1,8	6,8	2,6	1,40	460	1,15
5AM280S8e	55,0	740	93,6	0,83	108	709	1,9	5,9	2,0	3,29	705	1,15
5AM280M8e	75,0	740	94,0	0,82	148	967	2,0	6,0	2,1	4,00	790	1,15
5AM315S8e	90,0	740	94,5	0,85	170	1161	1,4	6,0	2,1	5,21	965	1,15
5AM315MA8e	110	740	94,5	0,86	206	1419	1,4	5,9	2,1	6,03	1025	1,1
5AM315MB8e	132	740	94,5	0,83	256	1702	1,7	6,5	2,3	6,50	1140	—
5AM280S10e	37,0	590	93,0	0,79	76,6	598	1,5	6,0	2,5	3,14	710	1,15
5AM280M10e	45,0	590	93,5	0,80	91,6	728	1,5	6,5	2,5	4,07	760	1,15
5AM315S10e	55,0	590	93,5	0,82	109	890	1,6	6,5	2,2	5,97	885	1,15
5AM280MA10e	75,0	590	93,5	0,85	143	1213	1,9	6,1	2,2	6,78	927	1,15
5AM280MB10	90,0	590	93,0	0,81	182	1456	2,1	5,8	2,2	6,78	975	—

Окончание табл. 6.14

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{1\text{ном}}$, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{д}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{д}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пз}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг	Сервис-фактор
5AM315S12e	45	490	93,0	0,79	93,2	876	1,8	5,6	2,0	5,97	888	1,15
5AM315MB12e	55	490	93,0	0,79	114	1071	1,8	5,6	2,0	6,78	927	1,15
5AM315MB12	75	490	92,2	0,80	155	1460	1,8	5,3	2,0	6,78	975	—

Таблица 6.15. Технические данные двигателей основного исполнения со степенью защиты IP23, класса нагревостойкости изоляции F

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{1\text{ном}}$, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{д}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{д}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пз}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг	Сервис-фактор
4AMH180S2	37	2940	91,0	0,87	71	120	1,6	7,0	2,4	0,08	170	1,15
4AMH180M2	45	2940	91,5	0,89	84	146	1,6	7,0	2,4	0,093	185	1,10
5AH200M2	55	2940	93,8	0,88	101	179	2,1	6,0	2,6	0,13	250	1,15
5AH200L2	75	2925	92,8	0,88	140	245	2,1	6,0	2,6	0,15	280	1,10
5AMH250S2	90	2960	93,4	0,92	159	290	1,6	6,5	2,6	0,47	485	1,15
5AMH250M2	110	2955	93,7	0,92	194	355	1,6	6,5	2,6	0,52	530	1,15
5AMH280S2	132	2965	94,7	0,92	231	425	1,6	6,2	2,2	0,85	720	1,15
5AMH280M2	160	2965	95,0	0,92	279	515	1,6	6,2	2,2	1,02	770	1,15
5AMH315S2	200	2970	95,0	0,92	348	643	1,7	7,5	2,5	1,42	965	1,15
5AMH315M2	250	2975	95,5	0,92	433	802	1,7	7,5	2,5	1,78	1105	1,15
4AMH180S4	30	1470	90,0	0,83	61	195	1,8	6,0	2,2	0,18	170	1,15
4AMH180M4	37	1470	90,5	0,86	72	240	1,8	6,0	2,2	0,22	190	1,10
5AH200M4	45	1465	92,5	0,86	86	293	2,2	6,0	2,2	0,28	260	1,15
5AH200L4	55	1470	93,0	0,84	107	361	2,6	6,5	2,6	0,34	290	1,15
5AMH250S4	90	1485	94,5	0,85	170	578	2,3	6,5	2,4	1,00	490	1,15
5AMH250M4	110	1485	94,8	0,85	207	707	2,4	6,6	2,3	1,20	540	1,15
5AMH280S4	132	1485	95,3	0,85	248	848	2,0	6,3	2,0	2,19	750	1,15
5AMH280M4	160	1485	96,0	0,89	285	1028	2,1	6,5	2,2	2,70	835	1,15
5AMH315S4	200	1485	95,4	0,86	370	1285	1,8	6,0	2,2	3,57	1050	1,15
5AMH315M4	250	1485	95,7	0,87	456	1613	1,7	5,6	1,8	3,97	1145	1,15
4AMH180S6	18,5	970	87,0	0,83	39	182	1,6	5,5	2,0	0,19	165	1,15
4AMH180M6	22	970	88,5	0,84	54	216	1,6	5,5	2,0	0,24	180	1,15

Окончание табл. 6.15

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{1\text{ном}}$, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{д}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{д}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пв}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг	Сервис-фактор
5АН200М6	30	980	90,5	0,81	62	292	2,4	6,0	2,3	0,39	240	1,15
5АН200Л6	37	975	91,0	0,81	76,5	362	2,5	5,5	2,1	0,46	265	—
5АНН250S6	55	985	92,7	0,83	109	533	1,8	5,3	1,8	1,20	440	1,15
5АНН250М6	75	985	93,3	0,83	147	727	1,7	6,5	2,3	1,30	475	1,15
5АНН280S6	90	985	94,7	0,85	170	872	2,1	5,8	2,2	3,04	715	1,15
5АНН280М6	110	985	94,8	0,85	208	1050	2,1	5,8	2,2	3,05	800	1,15
5АНН315S6	132	990	94,2	0,85	251	1273	1,9	6,7	2,6	4,54	905	1,15
5АНН315М6	160	990	94,8	0,87	295	1543	1,8	6,9	2,6	5,13	1005	1,15
4АНН180S8	15	730	87,0	0,74	36	196	1,6	5,5	2,0	0,24	175	1,15
4АНН180М8	18,5	730	88,5	0,8	40	242	1,6	5,5	2,0	0,30	195	1,10
5АН200М8	22	735	90,0	0,81	46	286	1,8	5,5	2,3	0,46	250	1,15
5АНН250S8	45	740	91,5	0,75	100	580	1,5	5,5	2,2	1,20	440	1,15
5АНН250М8	55	740	91,2	0,77	119	709	1,4	5,2	2,0	1,40	470	1,10
5АНН280S8	75	735	93,3	0,81	151	974	1,8	4,8	2,0	3,29	705	1,15
5АНН280М8	90	740	94,2	0,82	177	1161	2,0	5,5	2,0	4,00	790	1,15
5АНН315S8	110	740	94,1	0,82	217	1419	1,7	5,7	2,5	5,12	960	1,15
5АНН315М8	132	740	94,3	0,82	260	1703	1,7	5,7	2,5	6,03	1020	1,15

Таблица 6.16. Технические данные двигателей с повышенным скольжением со степенью защиты IP54, класса нагревостойкости изоляции F

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{1\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{д}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{д}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пв}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг
$2p = 2, n = 3000$ об/мин											
АИРСМ132М2	12,5	2840	86,5	0,89	24,7	42,0	2,6	6,5	2,8	0,024	77,5
$2p = 4, n = 1500$ об/мин											
АИРСМ132S4	8,5	1400	83,0	0,85	18,4	58,0	2,9	6,0	2,9	0,032	70,0
АИРСМ132М4	11,8	1400	86,5	0,83	24,4	80,5	3,4	6,5	3,5	0,045	83,5
5АС160М4	20,0	1400	86,0	0,87	40,5	136	2,4	5,0	2,6	0,087	140
АИРС180М4	22,0	1425	87,5	0,88	43,0	147	3,0	7,0	3,2	0,200	190

Окончание табл. 6.16

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{из}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{из}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг
$2p = 6, n = 1000$ об/мин											
АИРСМ132S6	6,3	925	81,0	0,80	14,8	6,5	2,6	5,5	2,6	0,048	68,5
АИРСМ132M6	8,5	930	82,0	0,80	19,7	87,2	2,9	6,0	3,1	0,067	81,5
5АС160М6	16,0	930	84,0	0,85	34,0	164	2,2	5,5	2,5	0,150	150
АИРС180М6	18,5	925	84,0	0,85	39,4	191	2,8	6,5	2,8	0,270	180
$2p = 8, n = 750$ об/мин											
АИРСМ132S8	4,5	685	76,5	0,70	12,8	62,7	2,5	4,5	2,5	0,082	65,8
АИРСМ132М8	6,0	690	79,0	0,70	16,5	83,0	2,8	4,5	2,8	0,045	81,5
АИРС180М8	15,0	675	82,0	0,80	35,1	212	2,8	5,0	2,8	0,270	180
5АС225М8	26,5	700	86,0	0,80	58,3	361	2,9	5,5	3,0	0,700	340

Таблица 6.17. Технические данные двухскоростных асинхронных двигателей со степенью защиты IP54, класса нагревостойкости изоляции F

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{из}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{из}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг
$2p = 4/2, n = 1500/3000$ об/мин											
АИР132S4/2	6,0	1455	86,0	0,85	12,5	39,0	2,0	7,0	2,5	0,032	70,0
	7,1	2900	82,0	0,90	14,6	23,0	2,0	7,0	2,6		
АИР132М4/2	8,5	1455	88,0	0,85	17,3	55,5	2,2	7,5	2,7	0,045	83,5
	9,5	2925	84,0	0,90	18,9	31,0	2,7	8,5	3,2		
АИР180S4/2	17,0	1470	89,0	0,84	34,0	110	1,6	6,7	2,8	0,16	170
	20,0	2930	86,0	0,90	39,3	65,0	1,5	6,4	2,6		
АИР180М4/2	22,0	1470	90,0	0,85	43,8	143	1,8	7,5	2,9	0,20	190
	26,0	2935	87,0	0,90	50,5	84,0	1,7	7,5	2,9		
5А200М4/2	27,0	1475	91,5	0,84	53,5	175	2,1	7,4	2,7	0,27	245
	35,0	2945	90,0	0,91	65,0	113	1,7	7,2	2,5		
5А200L4/2	30,0	1470	92,0	0,86	57,5	195	2,1	7,0	2,4	0,32	270
	38,0	2945	91,5	0,93	68,0	123	1,7	7,0	2,4		
5А225М4/2	42,0	1480	93,0	0,84	82,0	271	2,0	7,0	2,3	0,50	345
	48,0	2960	91,5	0,91	87,5	155	1,7	7,5	2,5		

Продолжение табл. 6.17

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{из}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{из}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{плз}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг
5AM250S4/2	55	1485	94,0	0,87	102,0	353	1,9	7,3	2,4	1,2	485
	60	2975	90,0	0,89	114,0	192	1,7	7,8	3,0		
5AM250M4/2	66	1485	94,5	0,88	121,0	429	1,9	7,2	2,3	1,7	520
	80	2970	91,0	0,90	148,0	257	1,6	7,2	2,6		
5AM250S4/2	75	1480	94,0	0,88	138,0	484	2,0	6,5	2,5	2,7	885
	90	2970	93,0	0,89	165,0	289	1,7	7,0	2,5		
2p = 6/4, n = 1000/1500 об/мин											
АИР132S6/4	5,0	965	82,5	0,77	12,0	49,5	1,6	5,6	2,5	0,053	68,5
	5,5	1435	84,0	0,90	11,1	36,6	1,8	5,7	2,1		
АИР132M6/4	6,7	970	85,0	0,75	16,0	65,9	2,1	6,2	2,6	0,074	81,5
	7,5	1440	86,0	0,90	14,8	49,7	1,8	6,2	2,2		
АИР180M6/4	15	975	87,0	0,78	33,6	147,0	2,3	6,6	2,9	0,27	180
	17	1450	87,0	0,90	33,0	112,0	1,8	6,0	2,4		
5A200M6/4	20	980	8,5	0,78	44,0	195,0	2,2	6,5	2,4	0,41	245
	22	1460	88,0	0,90	42,5	144,0	1,9	6,0	2,0		
5A200L6/4	24	980	8,0	0,75	55,3	234,0	2,7	6,9	2,7	0,46	265
	27	1480	88,5	0,90	51,6	174,0	2,2	6,5	2,2		
2p = 12/6, n = 500/1000 об/мин											
АИР180M12/6	7,0	485	79,0	0,6	22,5	138	1,6	4,5	2,3	0,27	180
	13,0	975	86,5	0,88	26,0	127	1,3	6,0	2,1		
5A200M12/6	8,0	485	78,0	0,51	30,5	157	2,1	4,0	2,2	0,41	245
	15,0	980	89,0	0,85	30,0	146	1,8	6,0	2,1		
5A200L12/6	10,0	485	81,5	0,60	31,0	197	1,8	4,0	1,8	0,46	265
	18,5	975	89,0	0,87	36,5	181	1,6	6,0	1,9		
5A225M12/6	14,0	485	83,5	0,58	44,0	275	1,8	4,0	1,9	0,65	320
	25,0	980	90,0	0,87	48,5	243	1,6	6,0	2,0		
5AM250S12/6	16,0	495	86,0	0,50	56,5	308	2,1	4,4	2,1	1,20	435
	30,0	990	92,0	0,85	58,5	289	1,8	6,6	2,0		
5AM250M12/6	18,5	490	85,0	0,55	60,0	360	1,8	4,0	1,8	1,40	455
	36,0	985	90,5	0,85	71,0	349	1,5	5,3	1,6		

Продолжение табл. 6.17

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{из}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{из}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг
2р = 8/4, n = 750/1500 об/мин											
АИР132S8/4	3,3	715	77,0	0,73	9,7	48	1,8	4,8	2,2	0,053	68,5
	5,3	1435	81,0	0,91	10,4	33	1,6	5,9	2,3		
АИР132М8/4	4,7	715	79,0	0,73	12,4	63	1,9	5,0	2,4	0,074	82,0
	7,5	1440	82,0	0,88	15,8	50	1,8	6,4	2,5		
АИР180М8/4	13,0	730	84,0	0,70	33,6	170	1,8	5,5	2,6	0,27	180
	18,5	1465	87,0	0,90	35,9	120	1,6	6,7	2,6		
5А200М8/4	15,0	730	86,0	0,66	40,0	196	2,1	5,3	2,2	0,41	245
	22,0	1460	89,0	0,89	42,0	144	1,8	6,4	2,2		
5А200L8/4	17,0	725	86,0	0,77	39,0	224	1,8	5,0	1,8	0,46	275
	24,0	1450	88,0	0,91	45,5	158	1,7	5,5	1,9		
5А225М8/4	23,0	735	89,0	0,71	55,5	299	2,0	5,5	2,2	0,70	330
	34,0	1475	90,5	0,91	63,0	220	1,5	6,5	2,2		
5АМ250S8/4	33,0	740	90,0	0,74	75,5	425	1,7	5,3	1,9	1,20	435
	47,0	1480	91,0	0,90	87,0	303	1,6	6,4	2,1		
5АМ250М8/4	37,0	740	92,0	0,75	81,5	477	2,0	6,0	2,0	1,40	465
	55,0	1480	92,0	0,91	100	355	1,7	7,0	2,2		
5АМ280М8/4	50,0	740	92,0	0,75	110	645	2,0	5,5	2,2	4,00	790
	75,0	1480	92,5	0,90	137	484	2,0	6,6	2,5		
2р = 8/6, n = 750/1000 об/мин											
АИР132S8/6	3,2	725	80,0	0,70	8,7	42	1,6	4,6	2,5	0,053	68,5
	4,0	965	82,0	0,81	9,2	40	1,4	5,0	2,2		
АИР132М8/6	4,5	720	82,0	0,70	11,9	60	2,0	5,4	2,5	0,074	81,5
	5,5	970	84,0	0,81	12,3	54	1,8	6,0	2,4		
АИР180М8/6	11,0	730	86,0	0,74	26,3	144	1,5	5,3	2,4	0,27	180
	15,0	970	88,0	0,86	30,2	148	1,15	6,0	2,4		
5А200М8/6	15,0	730	89,5	0,72	35,5	196	2,2	5,5	2,2	0,41	245
	18,5	975	90,0	0,84	37,0	181	2,0	6,0	2,0		
5А200L8/6	18,5	730	89,5	0,72	43,5	242	2,2	5,5	2,3	0,46	265
	23,0	975	90,0	0,84	46,5	225	2,0	6,0	2,1		
5А225М8/6	22,0	740	91,0	0,71	52,0	284	2,4	6,0	2,5	0,70	330
	30,0	985	91,5	0,85	58,5	290	2,0	6,0	2,1		

Окончание табл. 6.17

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{н}}^{\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{из}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{из}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг
5AM250S8/6	30,0	740	92,0	0,70	71,0	387	2,1	6,0	2,2	1,2	435
	37,0	990	92,5	0,83	73,5	358	1,8	6,4	2,0		
5AM250M8/6	42,0	740	92,5	0,74	93,5	542	2,0	5,5	2,0	1,4	485
	50,0	985	92,5	0,85	96,5	484	1,9	6,1	1,9		

Таблица 6.18. Технические данные трехскоростных асинхронных двигателей со степенью защиты IP54, класса нагревостойкости изоляции F

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{из}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{из}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг
$2p = 6/4/2, n_1 = 1000/1500/3000$ об/мин											
АИР132S6/4/2	2,8	955	75,0	0,75	7,2	28	1,8	5,0	2,4	0,053	68,5
	4,0	1440	80,0	0,85	8,6	26	1,7	5,0	2,5		
	4,5	2895	78,0	0,90	9,6	15	2,2	6,3	2,8		
АИР132М6/4/2	3,8	955	78,0	0,73	9,7	38	1,7	5,5	2,5	0,074	81,5
	5,3	1440	84,0	0,85	11,1	35	1,7	6,5	2,5		
	6,3	2895	82,0	0,90	12,9	21	1,9	7,0	3,0		
$2p = 8/4/2, n_1 = 750/1500/3000$ об/мин											
АИР132S8/4/2	1,8	710	72,0	0,62	6,1	24	1,6	4,0	2,3	0,053	68,5
	3,4	1440	82,0	0,84	7,5	22	1,7	6,0	2,5		
	4,0	2895	78,0	0,91	8,5	13	1,9	6,5	2,7		
АИР132М8/4/2	2,4	710	70,0	0,61	7,8	32	1,9	4,5	2,0	0,074	81,5
	4,5	1440	82,0	0,85	9,6	30	1,9	6,3	2,3		
	5,6	2895	79,0	0,92	11,4	18	2,0	6,7	2,5		

Окончание табл. 6.18

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$I_{пн}$, А при 380 В	$M_{ном}$, Н·м	$M_{II}/M_{ном}$	$I_{II}/I_{ном}$	$M_{III}/M_{ном}$	J , кг·м ²	Масса, кг
$2p = 8/6/4$, $n_1 = 750/1000/1500$ об/мин											
АИР132S8/6/4	1,9	710	68,0	0,66	6,5	25	1,9	4,0	2,5	0,053	68,5
	2,4	950	74,0	0,81	6,1	24	1,7	4,4	2,2		
	3,4	1410	75,0	0,90	7,7	23	1,5	4,6	2,0		
АИР132M8/6/4	2,8	720	72,0	0,63	9,4	37	1,9	4,5	2,5	0,074	82,5
	3,0	960	76,0	0,78	7,7	30	1,7	5,0	2,2		
	5,0	1425	79,0	0,90	10,7	33,5	1,5	5,2	2,0		
АИР180M8/6/4	8,0	740	78,0	0,68	23,0	104	1,6	5,4	2,5	0,27	180
	11,0	975	83,0	0,83	24,3	107	1,7	6,1	2,5		
	12,5	1475	81,0	0,87	27,0	81	1,3	6,5	2,4		
5A200M8/6/4	10,0	740	81,0	0,62	30,5	130	2,4	5,5	2,7	0,41	245
	12,0	985	83,5	0,81	27,0	116	1,8	6,0	2,5		
	17,0	1475	83,5	0,86	36,0	110	1,8	6,5	2,5		
5A200L8/6/4	12,0	735	83,5	0,69	31,5	156	2,0	5,3	2,2	0,46	270
	15,0	985	85,0	0,84	32,0	145	2,0	6,0	2,2		
	20,0	1475	85,5	0,89	40,0	129	1,6	6,5	2,2		
5A225M8/6/4	15,0	740	85,0	0,69	39,0	193	1,8	5,5	2,4	0,70	330
	17,0	985	86,0	0,86	35,0	165	1,9	6,5	2,5		
	25,0	1480	88,0	0,90	48,0	161	1,3	6,3	2,1		
5AM250S8/6/4	22,0	740	88,0	0,73	52,0	284	1,7	5,7	2,1	1,20	435
	25,0	990	88,5	0,84	51,0	241	2,0	7,6	2,6		
	33,0	1485	89,5	0,90	62,5	212	1,4	7,0	2,2		
5AM250M8/6/4	24,0	740	88,0	0,73	57,0	309	1,7	5,7	2,1	1,40	465
	33,0	990	91,0	0,84	65,5	318	2,3	7,4	2,6		
	38,0	1485	89,5	0,90	71,5	244	1,4	6,8	2,2		

Таблица 6.19. Технические данные четырехскоростных асинхронных двигателей со степенью защиты IP54, класса нагревостойкости изоляции F

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_f/M_{\text{ном}}$	$I_f/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг
$2p = 12/8/6/4$, $n_1 = 500/750/1000/1500$ об/мин											
АИР180М12/6/4	3,0	485	0,0	0,60	12,7	59	1,7	4,1	2,6	0,27	180
	5,5	730	75,0	0,72	15,5	72	1,3	4,8	2,2		
	6,0	965	80,0	0,90	12,7	59	1,2	4,8	2,0		
	9,0	1465	81,0	0,91	18,6	59	1,2	6,0	2,1		
5А200М12/6/4	4,5	490	68,0	0,60	17,0	88	1,7	3,5	2,0	0,41	245
	8,0	735	80,0	0,74	20,5	104	1,3	4,5	1,8		
	9,0	980	82,0	0,88	19,0	88	1,3	5,0	1,8		
	12,0	1470	85,0	0,92	23,5	78	1,1	5,1	1,8		
5А200L12/8/6/4	5,0	490	70,0	0,60	18,0	97	1,7	4,0	1,8	0,46	270
	9,5	735	81,0	0,75	24,0	123	1,4	5,0	1,9		
	11,0	980	80,0	0,89	23,5	107	1,1	4,5	1,6		
	15,0	1470	84,0	0,92	29,5	97	1,1	5,0	1,7		
5А225М12/8/6/4	7,1	490	73,0	0,56	26,5	138	2,2	4,5	2,5	0,70	325
	13,0	740	83,0	0,65	36,5	168	1,8	6,0	2,8		
	14,0	985	86,0	0,87	28,5	136	1,5	6,0	2,1		
	20,0	1490	88,0	0,90	38,5	128	1,3	7,3	2,7		
5АМ250S12/8/6/4	9,0	495	78,0	0,54	32,5	173	2,1	4,7	2,2	1,20	435
	17,0	745	86,0	0,69	43,5	218	1,7	5,9	2,4		
	18,5	990	88,0	0,86	37,0	178	1,5	5,9	2,0		
	27,0	1485	88,0	0,89	52,5	173	1,4	7,0	2,5		
5АМ250М12/8/6/4	12,0	495	80,0	0,54	43,2	231	2,2	4,8	2,3	1,40	465
	21,0	745	87,0	0,71	51,7	269	1,7	6,1	2,2		
	24,0	990	89,0	0,86	47,7	231	1,7	6,6	2,1		
	30,0	1490	89,0	0,89	57,6	193	1,6	7,8	2,6		

Таблица 6.20. Технические данные двигателей по нормам CENELEK со степенью защиты IP55, класса нагревостойкости изоляции F (2p = 2)

Типоразмер	$P_{ном}, кВт$	$n_{ном}, об/мин$	$\eta_{ном}, \%$	$\cos \varphi_{ном}$	$I_{ном}$ при 380 В, А	$M_{ном}, Н \cdot м$	$M_s/M_{ном}$	$I_s/I_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$J, кг \cdot м^2$	Масса, кг	Сервис-фактор
5A90S2K	1,5	2850	80,0	0,84	3,2	5,0	2,4	6,5	2,5	0,0018	14,3	1,15
5A90L2K	2,2	2850	81,0	0,85	4,6	7,4	2,7	6,5	2,8	0,0021	15,8	1,15
6A132SA2	5,5	2915	87,0	0,87	10,6	18,2	2,5	7,5	3,3	0,0100	55,0	1,15
6A132SB2	7,5	2920	88,0	0,89	13,8	24,7	2,4	7,5	3,3	0,0131	58,5	1,15
АИС160МА2	11,0	2910	88,0	0,88	20,5	36,0	2,7	8,5	3,5	0,027	81,0	1,15
АИС160МВ2	15,0	2895	89,5	0,90	26,2	49,5	2,5	8,0	3,2	0,035	91,0	1,10
6A160L2	18,5	2920	90,5	0,89	33,2	60,5	2,2	7,0	3,0	0,039	133	1,15
6A180M2	22,0	2915	90,5	0,89	39,5	72,0	2,3	6,8	2,9	0,052	140	1,15
АИС200LA	30,0	2940	91,5	0,89	53,3	97,0	2,1	6,8	3,0	0,076	185	—
5A200LB2K2	37,0	2940	93,0	0,90	64,0	120,0	2,3	7,4	3,0	0,13	25,0	1,15
5A225M2K	45,0	2940	93,4	0,90	77,5	146,0	2,4	7,4	3,0	0,15	275	1,10
5A250M2K	55,0	2950	93,4	0,91	93,5	178,0	2,3	7,5	2,8	0,21	340	1,10
5A280S2K	75,0	2960	93,6	0,92	126	242,0	2,0	7,5	3,0	0,47	485	1,15
5A280M2K	90,0	2960	94,0	0,92	150	290,0	2,0	7,5	3,0	0,52	515	1,15
6A315S2	110	2965	93,5	0,92	185	354,0	1,6	6,5	2,3	0,85	720	1,10
6A315M2	132	2965	94,5	0,92	220	425,0	1,8	7,2	2,5	1,02	770	1,15
6A315LA2	160	2965	94,0	0,93	264	515,0	1,8	7,5	2,5	1,42	970	1,15
6A315LB2	200	2970	95,0	0,93	327	643,0	1,8	8,0	2,7	1,48	1110	1,10

Таблица 6.21. Технические данные двигателей по нормам CENELEK со степенью защиты IP55, класса нагревостойкости изоляции F (2p = 4)

Типоразмер	$P_{ном}, кВт$	$n_{ном}, об/мин$	$\eta_{ном}, \%$	$\cos \varphi_{ном}$	$I_{ном}$ при 380 В, А	$M_{ном}, Н \cdot м$	$M_s/M_{ном}$	$I_s/I_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$J, кг \cdot м^2$	Масса, кг	Сервис-фактор
5A90S4K	1,1	1410	73,0	0,79	2,8	7,5	2,0	4,8	2,3	0,0034	13,3	1,15
5A90L4K	1,5	1410	75,0	0,81	3,6	10,0	1,9	5,0	2,2	0,0036	15,0	1,15
6A132S4	5,5	1440	86,0	0,85	10,3	36,5	2,4	7,0	3,0	0,020	63,0	1,15
6A132M4	7,5	1450	87,5	0,86	14,4	49,5	2,3	7,0	2,9	0,025	79,0	1,15
АИС160М4	11,0	1450	89,0	0,86	21,0	72,2	2,2	7,3	3,0	0,045	87,0	1,15
6A160L4	15,0	1450	89,5	0,86	28,1	90,0	2,2	6,1	2,6	0,075	127	1,15

Окончание табл. 6.21

Типоразмер	$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$	$n_{\text{ном}}, \text{ об/мин}$	$\eta_{\text{ном}}, \%$	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{I ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$	$J, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	Масса, кг	Сервис-фактор
6A180M4	18,5	1450	90,0	0,86	34,5	122	2,2	6,5	2,6	0,087	142	1,15
6A180L4	22,0	1450	90,5	0,84	41,8	145	2,3	6,1	2,6	0,096	152	1,15
AИC200L4	30,0	1455	91,4	0,86	55,2	197	2,5	6,8	2,6	0,20	190	—
5A225S4K	37,0	1470	92,0	0,85	68,5	240	2,4	6,7	2,5	0,27	260	1,15
5A225M4K	45,0	1470	92,5	0,85	82,5	292	2,8	7,1	2,8	0,32	280	1,10
5A250M4K	55,0	1475	93,0	0,86	99,5	356	2,2	6,5	2,2	0,50	350	1,10
5A280S4K	75,0	1485	94,3	0,85	135	482	2,2	7,2	2,3	1,00	490	1,15
5A280M4K	90,0	1485	95,0	0,88	156	578	2,2	7,3	2,3	1,20	525	1,15
6A315S4	110	1485	95,1	0,87	192	707	2,0	6,4	2,0	2,19	790	1,15
6A315M4	132	1485	95,8	0,88	226	848	2,3	7,5	2,2	2,70	885	1,15
6A315LA4	160	1485	95,3	0,89	273	1028	1,9	6,2	2,2	3,57	1100	1,10
6A315LB4	200	1485	95,6	0,89	340	1285	1,9	6,5	2,0	3,97	1150	—

Таблица 6.22. Технические данные двигателей по нормам CENELEC со степенью защиты IP55, класса нагревостойкости изоляции F ($2p = 6$)

Типоразмер	$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$	$n_{\text{ном}}, \text{ об/мин}$	$\eta_{\text{ном}}, \%$	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{I ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$	$J, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	Масса, кг	Сервис-фактор
5A90S6K	0,75	930	70,0	0,68	2,3	7,7	2,0	4,5	2,3	0,0033	14,3	1,15
5A90L6K	1,1	930	71,0	0,69	3,2	11,3	2,0	4,5	2,3	0,0048	16,3	1,15
6A132S6	3,0	950	81,0	0,78	6,9	30,0	2,3	5,5	2,8	0,024	53,0	1,15
6A132MA6	4,0	955	82,0	0,78	9,1	40,0	2,2	5,5	2,6	0,029	58,0	1,15
6A132MB6	5,5	955	84,5	0,80	11,8	55,0	2,2	6,0	2,8	0,036	68,5	1,15
AИC160MB6	7,5	960	85,5	0,80	15,9	74,6	2,2	6,3	2,8	0,067	86,0	1,15
6A160L6	11,0	970	87,0	0,82	22,3	108	1,9	6,5	2,5	0,11	122	1,15
6A180L6	15,0	970	88,5	0,83	29,5	148	2,0	6,8	2,7	0,15	150	1,15
AИC200LA6	18,5	975	89,0	0,84	35,8	181	2,0	6,5	2,8	0,24	190	1,15
5A200LB6K	22,0	975	90,5	0,83	42,5	215	2,2	6,0	2,2	0,41	250	1,15
5A225M6K	30,0	975	90,5	0,84	57,0	294	2,4	6,0	2,2	0,46	285	1,10
5A250M6K	37,0	980	91,5	0,84	69,5	360	2,3	6,2	2,5	0,65	335	1,15
5A280S6K	45,0	985	93,0	0,84	83,0	436	2,0	6,2	2,0	1,20	440	1,15

Окончание табл. 6.22

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пmax}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг	Сервис-фактор
5A280M6K	55	985	92,5	0,84	102	533	2,0	6,2	2,0	1,30	460	—
6A315S6	75	990	94,5	0,85	135	723	1,9	6,2	2,0	3,04	745	1,15
6A315M6	90	990	94,5	0,85	162	868	1,9	6,2	2,2	3,25	780	1,15
6A315LA6	110	990	94,8	0,89	188	1060	1,8	6,9	2,6	4,54	960	1,15
6A315LB6	132	990	95,0	0,90	223	1273	1,8	6,9	2,4	5,13	1010	1,15

Таблица 6.23. Технические данные двигателей по нормам CENELEC со степенью защиты IP55, класса нагревостойкости изоляции F (2p = 8)

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пmax}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг	Сервис-фактор
5A90S8K	0,37	695	56,0	0,62	1,5	5,1	2,0	3,5	2,2	0,0030	13,8	1,15
5A90L8K	0,55	700	58,0	0,60	2,3	7,5	2,0	3,5	2,2	0,0047	16,0	1,15
6A132S8	2,2	710	77,0	0,70	5,9	29,0	2,0	4,5	2,5	0,024	53,0	1,15
6A132M8	3,0	710	78,0	0,70	7,9	40,0	2,0	4,5	2,5	0,029	58,0	1,15
АИС160МА8	4,0	715	82,0	0,70	10,0	53,4	2,0	4,8	2,5	0,053	75,0	1,15
АИС160МВ8	5,5	715	83,0	0,73	13,1	73,4	2,0	5,3	2,5	0,074	85,0	1,15
6A160L8	7,5	725	86,0	0,72	17,5	99,0	1,6	5,0	2,2	0,11	120	1,15
6A180L8	11,0	725	87,0	0,74	24,7	145	1,6	5,0	2,2	0,15	145	1,15
АИС200L8	15,0	730	88,0	0,75	32,8	196	1,9	6,2	2,3	0,25	190	1,10
5A225S8K	18,5	735	90,0	0,76	39,0	240	2,0	6,4	2,7	0,41	250	1,15
5A225M8K	22,0	735	90,0	0,77	46,0	286	2,0	6,2	2,6	0,46	265	1,15
5A250M8K	30,0	735	91,0	0,78	61,0	389	2,1	5,5	2,2	0,70	345	1,15
5A280S8K	37,0	740	92,0	0,73	79,5	477	1,8	6,5	2,6	1,20	440	1,15
5A280M8K	45,0	740	93,0	0,75	93,0	580	1,8	6,8	2,6	1,40	470	1,15
6A315S8	55,0	740	93,6	0,83	102	709	1,9	5,9	2,0	3,29	725	1,15
6A315M8	75,0	740	94,0	0,82	141	967	2,0	6,0	2,1	4,00	790	1,15
6A315LA8	90,0	740	94,5	0,85	162	1161	1,4	6,0	2,1	5,21	965	1,15
6A315LB8	110	740	94,5	0,86	196	1419	1,4	5,9	2,1	6,03	1025	1,10

Таблица 6.24. Технические данные двухскоростных двигателей по нормам CENELEC со степенью защиты IP55, класса нагревостойкости изоляции F

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{из}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{из}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг
$2p = 4/2, n = 1500/3000$ об/мин											
АИС180L4/2	17	1470	89,0	0,84	32,9	110	1,6	6,7	2,8	0,16	170
	20	2930	86,0	0,90	37,3	65,1	1,5	6,4	2,6		
АИС200LA4/2	22	1470	90,0	0,85	41,6	143	1,8	7,5	2,9	0,20	190
	26	2935	87,0	0,90	48,0	84,6	1,7	7,5	2,9		
5A225S4/2K	27	1475	91,5	0,84	51,0	175	2,1	7,4	2,7	0,27	255
	35	2945	90,0	0,91	62,0	113	1,7	7,2	2,5		
5A225M4/2K	30	1470	92,0	0,86	54,8	195	2,1	7,0	2,4	0,31	275
	38	2945	91,5	0,93	64,5	123	1,7	7,0	2,4		
5A250M4/2K	42	1480	93,0	0,84	77,7	271	2,0	7,0	2,3	0,5	350
	48	2960	91,5	0,91	83,3	155	1,7	7,5	2,5		
5A280S4/2K	55	1485	94,0	0,87	97,0	353	1,9	7,3	2,4	1,2	490
	60	2975	90,0	0,89	108,0	192	1,7	7,8	3,0		
5A280M4/2K	66	1485	94,5	0,88	115,0	429	1,9	7,2	2,3	1,4	525
	80	2970	91,0	0,90	141,0	257	1,6	7,2	2,6		
$2p = 6/4, n = 1000/1500$ об/мин											
АИС200LA6/4	15	975	87,0	0,78	32,0	147	2,3	6,6	2,9	0,27	180
	17	1450	87,0	0,90	31,4	112	1,8	6,0	2,4		
АИС200LB6/4K	20	980	88,5	0,78	42,0	195	2,2	6,5	2,4	0,41	225
	22	1460	88,0	0,90	40,0	144	1,9	6,0	2,0		
5A225M6/4K	24	980	88,0	0,75	52,5	234	2,7	6,9	2,7	0,46	270
	27	1460	88,5	0,90	49,0	174	2,2	6,5	2,2		
$2p = 8/4, n = 750/1500$ об/мин											
АИС200Д8/4	13	730	84,0	0,70	32,0	170	1,8	5,5	2,6	0,27	180
	19,5	1465	87,0	0,90	34,1	120	1,6	6,7	2,6		
5A225S8/4K	15	730	86,0	0,66	38,0	196	2,1	5,3	2,2	0,41	255
	22	1460	89,0	0,89	40,0	144	1,8	6,4	2,2		
5A225M8/4K	17	725	86,0	0,77	37,0	224	1,8	5,0	1,8	0,46	280
	24	1450	88,0	0,91	43,5	158	1,7	5,5	1,9		
5A250M8/4K	23	735	89,0	0,71	52,5	299	2,0	5,5	2,2	0,70	335
	34	1475	90,5	0,91	59,5	220	1,5	6,5	2,2		

Окончание табл. 6.24

Типоразмер	$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$	$n_{\text{ном}}, \text{ об/мин}$	$\eta_{\text{ном}}, \%$	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{плз}}/M_{\text{ном}}$	$J, \text{ кг} \cdot \text{ м}^2$	Масса, кг
5A280S8/4K	33	740	90,0	0,74	71,5	425	1,7	5,3	1,9	1,24	440
	47	1480	91,0	0,90	83,0	303	1,6	6,4	2,1		
5A280M8/4K	37	740	92,0	0,75	77,5	477	2,0	6,0	2,0	1,40	470
	55	1485	92,0	0,91	95,0	355	1,7	7,0	2,2		
$2p = 8/6, n = 750/1000 \text{ об/мин}$											
AHC200L8/6	11	730	86,0	0,74	25,0	144	1,5	5,3	2,4	0,27	190
	15	970	88,0	0,86	28,6	148	1,15	6,0	2,4		
5A225S8/6K	15	730	89,5	0,72	33,5	196	2,2	5,5	2,2	0,41	225
	18,5	975	90,0	0,84	35,5	181	2,0	6,0	2,0		
5A225M8/6K	18,5	730	89,5	0,72	41,5	242	2,2	5,5	2,3	0,46	270
	23	975	90,0	0,84	44,0	215	2,0	6,0	2,1		
5A250M8/6K	22	740	91,0	0,71	49,0	297	2,4	6,0	2,5	0,70	335
	30	985	91,5	0,85	55,5	291	2,0	6,0	2,1		
5A280S8/6K	30	740	92,0	0,70	67,5	387	2,1	6,0	2,2	1,2	440
	37	990	92,5	0,83	69,5	358	1,8	6,4	2,0		
5A280M8/6K	42	740	92,5	0,74	88,5	542	2,0	5,5	2,0	1,4	490
	50	985	92,5	0,85	92,0	484	1,9	6,1	1,9		

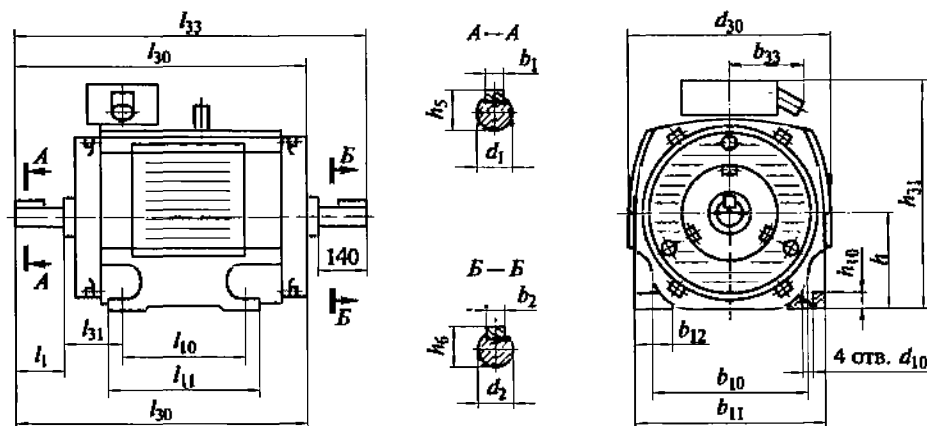


Рис. 6.2. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей серии ВЭМЗ исполнения по степени защиты IP23 (см. табл. 6.15) и способу монтажа IM1001 и IM1002 (см. табл. 6.25)

Таблица 6.25. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателя по степени защиты IP23 (см. табл. 6.15) и способам монтажа IM1001 и IM1002

Типоразмер	Число полюсов	Габаритные размеры, мм				Установочно-присоединительные размеры												
		h_{30}	h_{31}	d_{30}	h_{33}	h_1	h_{10}	h_{11}	d_1	d_2	b_1	b_2	h	h_5	h_6			
4AMH180S	2	580	470	378	695	110	203	253	48		14	14	180	51,5	51,5			
4AMH180M		620					735	241	291	55								
4AMH180S	4, 6, 8	580			695		203	253	48	48	16			16		200	59,0	
4AMH180M		620			735		241	291										
5AH200M	2	720	490	422	835	140	267	337	55	55	16	16	200	59,0				
5AH200L							305	375										
5AH200M	4, 6, 8	750			865		267	337	60		18			64,0				
5AH200L		780			895		305	375										
5AMH250S	2	935	630	545	1085	140	311	440	65	65	18	18	250	69,0	69,0			
5AMH250M	2	965			1115		349											
5AMH250S	4, 6, 8	935			1085		311		75	70	20	20		79,5	74,5			
5AMH250M	4, 6	965			1115		349											
5AMH250M	8	935			1085													
5AMH280M	2	1080	710	620	1230	170	419	510	70	60	22		280	74,5	64,0			
5AMH280S	4, 6, 8	1110					368		80	65				85,0	69,0			
5AMH280M	4, 6	1080			1330													
5AMH280M	8	1110			1260													
5AMH315S	2	1160	815	680	1310	140	406	620	90	65	25	18	315	95,0	69,0			
5AMH315M		1260			1410		457											
5AMH315S	4	1290			1440	170	406											
5AMH315M							457											
5AMH315S	6, 8	1190			1340	406												
5AMH315M							457											

6.6. Двигатели однофазные асинхронные

Известно (см. 4 15.3), что трехфазный асинхронный двигатель может быть использован для работы от однофазной сети. Но наряду с этим электротехнической промышленностью изготавливаются асинхронные однофазные и конденсаторные двигатели. Обычно на статоре такого двигателя имеются две обмотки, оси которых смещены в пространстве на 90 эл. град, одна из которых главная, а другая вспомогательная. Рассмотрим некоторые серии однофазных асинхронных двигателей.

1. Универсальные асинхронные двигатели серии УАД имеют на статоре трехфазную обмотку, соединенную «звездой», и могут работать как от трехфазной, так и однофазной сетей напряжением 220 В, частотой 50 Гц. В однофазной сети двигатели работа-

ют как конденсаторные. Их включают по схеме рис. 4.32, д с применением пускового конденсатора (при пуске под нагрузкой) или без него. Рекомендуемое значение емкости рабочего конденсатора указано в табл. 6.26. При работе в однофазной сети мощность двигателя понижается на 20—40 %. В табл. 6.26 приведены технические данные двигателей этой серии. Двигатели рассчитаны для работы в продолжительном режиме S1; двигатели изготавливают с одним или двумя выходными концами вала. Последняя цифра в обозначении типоразмера указывает на число полюсов в обмотке статора.

2. Серия асинхронных двигателей АИР включает модификацию однофазных двигателей (в обозначении типоразмеров введена буква Е). Эти двигатели имеют такое же конструктивное исполнение, что и трехфазные, и работают как конденсаторные. По жела-

Таблица 6.26. Технические данные универсальных асинхронных двигателей серии УАД

А. В трехфазном режиме

Типоразмер	$P_{ном}$, Вт	$n_{ном}$, об/мин	$I_{ном}$, А	η , %	$M_{max}/M_{ном}$	$M_n/M_{ном}$	$I_n/I_{ном}$
УАД-12	1,5	2700	0,055	14	2,5	2,5	2,0
УАД-22	4,0	2700	0,08	28	2,0	1,5	2,0
УАД-32	7,0	2700	0,11	30	2,0	2,0	2,5
УАД-42	13,0	2700	0,13	45	2,0	2,0	3,2
УАД-52	20,0	2700	0,17	55	2,0	2,0	4,5
УАД-62	40,0	2700	0,25	60	1,5	1,5	6,0
УАД-72	70,0	2700	0,40	65	1,5	1,5	6,0
УАД-24	1,2	1280	0,05	9	1,5	1,5	1,5
УАД-34	2,5	1250	0,09	11	1,5	1,5	1,5
УАД-44	6,0	1280	0,13	20	1,5	1,5	2,0
УАД-54	9,0	1280	0,17	25	1,5	1,5	2,5
УАД-64	20,0	1280	0,23	40	1,5	1,5	3,0
УАД-74	30,0	1280	0,30	50	1,5	1,5	3,5

Окончание табл. 6.26

Б. В однофазном режиме

Типоразмер	$P_{ном}$, Вт	$n_{ном}$, об/мин	$I_{ном}$, А	η_{max} , %	$M_{max}/M_{ном}$	$M_p/M_{ном}$	$I_p/I_{ном}$	$C_{р\text{аб}}$, мкФ
УАД-12	1,0	2750	0,055	10	2,0	0,5	2,0	0,5
УАД-22	3,0	2750	0,08	20	2,0	1,0	2,0	1,0
УАД-32	5,0	2750	0,11	25	1,5	0,3	2,5	1,5
УАД-42	10,0	2750	0,13	44	1,5	0,3	3,0	1,5
УАД-52	18,0	2750	0,19	50	1,5	0,3	3,5	2,0
УАД-62	30,0	2750	0,30	54	1,5	0,2	4,0	4,0
УАД-72	50,0	2750	0,42	60	1,5	0,1	5,0	5,0
УАД-24	1,0	1280	0,055	9	1,5	0,5	1,5	0,5
УАД-34	2,0	1280	0,09	11	1,5	0,5	1,5	1,0
УАД-44	4,0	1300	0,14	14	1,5	0,5	1,5	2,0
УАД-54	8,0	1300	0,16	25	1,5	0,5	2,0	3,0
УАД-64	15,0	1300	0,23	35	1,5	0,3	2,5	3,0
УАД-74	25,0	1300	0,30	45	1,5	0,2	3,0	4,0

нию заказчика двигатели комплекту-
ются конденсаторами, пристроенными
на корпусе. Двигатели рассчитаны для

включения в сеть напряжением 220 В,
частотой 50 Гц; режим работы продол-
жительный S1. Двигатели изготавлива-

Таблица 6.27. Технические данные однофазных асинхронных двигателей
серии АИРЕ

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$I_p/I_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_p/M_{ном}$	$C_{р\text{аб}}/U_c$, мкФ/В
АИРЕ71А2	0,55	2850	75	0,90	4,3	2,0	0,50	16/450
АИРЕ71В2	0,76	2790	71	0,90	4,0	1,9	0,55	26/450
АИРЕ71С2	1,10	2790	76	0,90	3,8	2,0	0,55	36/450
АИРЕ71А4	0,37	1360	64	0,90	3,0	2,0	0,6	14/450
АИРЕ71В4	0,55	1340	69	0,90	3,0	1,8	0,6	16/450
АИРЕ71С4	0,76	1340	64	0,90	3,0	1,8	0,55	25/450
АИРЕ80А2	1,10	2790	74	0,95	3,6	2,0	0,45	25/450
АИРЕ80В2	1,50	1790	76	0,95	4,0	1,9	0,45	40/450
АИРЕ80С2	2,20	1790	76	0,95	3,4	1,9	0,45	50/450
АИРЕ80А4	0,76	1400	71	0,92	3,0	1,8	0,50	26/450
АИРЕ80В4	1,10	1350	71	0,95	2,8	1,8	0,46	30/450
АИРЕ80С4	1,50	1350	71	0,95	2,8	1,8	0,46	40/450
АИРЕ100С4	2,20	1400	76	0,95	3,2	1,9	0,46	60/450

ют с высотами оси вращения 71, 80 и 100 мм (табл. 6.27).

3. Двигатели однофазные асинхронные конденсаторные ДАК предназначены для привода бытовых приборов, машин и электроинструмента.

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии ДАК:

ДАК X X X H IM9081 C18 P01 D41 X
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

1 — ДАК — двигатель асинхронный конденсаторный;

2 — наружный диаметр статора, мм: 95, 98, 110, 125;

3 — номинальная мощность, Вт: 25, 40, 60, 90, 120, 180;

4 — синхронная частота вращения $n_1 \cdot 10^{-3}$: 1,5 или 3;

5 — буква H — условное обозначение степени защиты IP10 и способа охлаждения IC01;

6 — IM9081 — исполнение по способу монтажа;

7 — тип обмотки статора C18 — двухфазная обмотка статора;

8 — тип обмотки ротора P01;

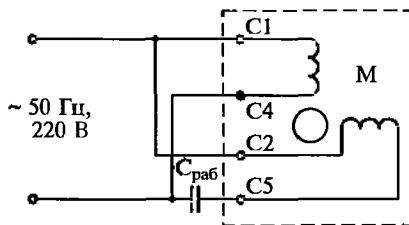


Рис. 6.3. Принципиальная электрическая схема включения двигателей серии ДАК

9 — Д41 — двигатель реверсивный;

10 — климатическое исполнение (УХЛ или О) и категория размещения (2 или 4).

Пример обозначения: ДАК-110-25-1Ю5-H-IM9082-C18-P01-УХЛ4.

Режим работы продолжительный S1. Двигатели предназначены для включения в сеть напряжением 220 В частотой 50 Гц. Схема включения двигателей представлена на рис. 6.3.

Технические данные двигателей приведены в табл. 6.28, габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей указаны на рис. 6.4—6.9.

Таблица 6.28. Технические данные асинхронных однофазных конденсаторных двигателей серии ДАК

Типоразмер	$P_{ном}$, Вт	$I_{ном}$, А	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$M_{max}/M_{ном}$	$M_{п}/M_{ном}$	$C_{раб}$, мкФ	Мас- са, кг
ДАК95-25-1,5	25	0,35	1380	42	1,6	0,65	2,0	1,8
ДАК95-60-3	60	0,55	2800	55	1,8	0,65	3,9	1,9
ДАК95-60-3К*	60	0,55	2800	55	1,8	0,65	3,9	1,9
ДАК98-90-3К*	90	0,85	2750	52	1,65	0,65	3,9	2,27
ДАК110-25-1,5	25	0,48	1340	24	2,1	1,7	3,9	1,8
ДАК110-40-1,5	40	0,56	1360	36	1,95	1,2	3,9	2,2
ДАК110-90-1,5	90	1,15	1350	46	1,75	0,7	4,0	2,75
ДАК110-120-1,5М6**	120	1,2	1350	53	1,7	0,7	6,0	3,3
ДАК125-180-1,5	180	1,7	1370	57	1,6	0,55	6,0	4,5

* Двигатель изготовлен с подшипниками качения.

** Резьба на выступающем конце вала.

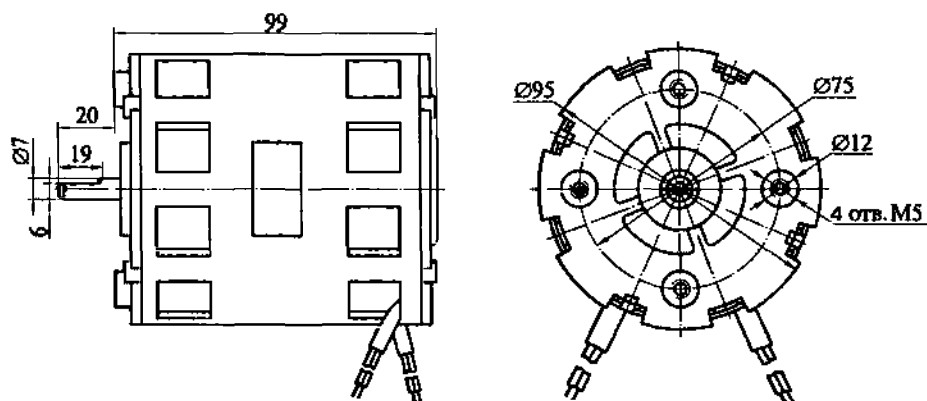


Рис. 6.4. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей ДАК 95-25-1,5 и ДАК 95-60-3

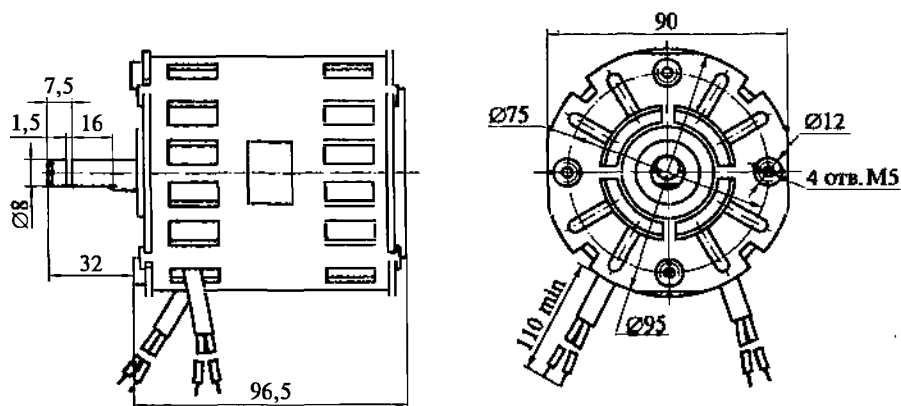


Рис. 6.5. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей ДАК 95-60-3К

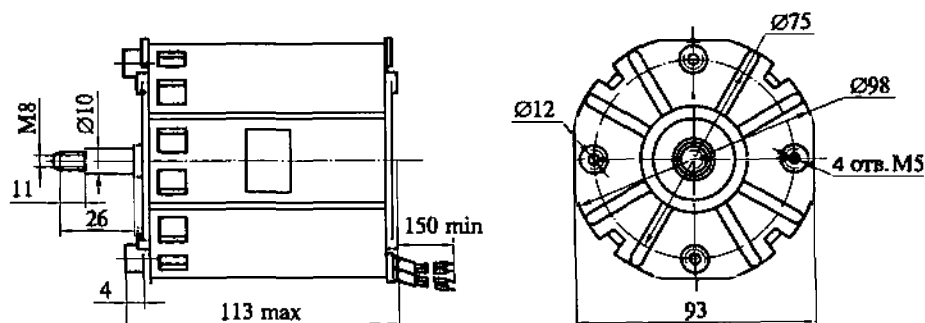


Рис. 6.6. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей ДАК 98-90-3К

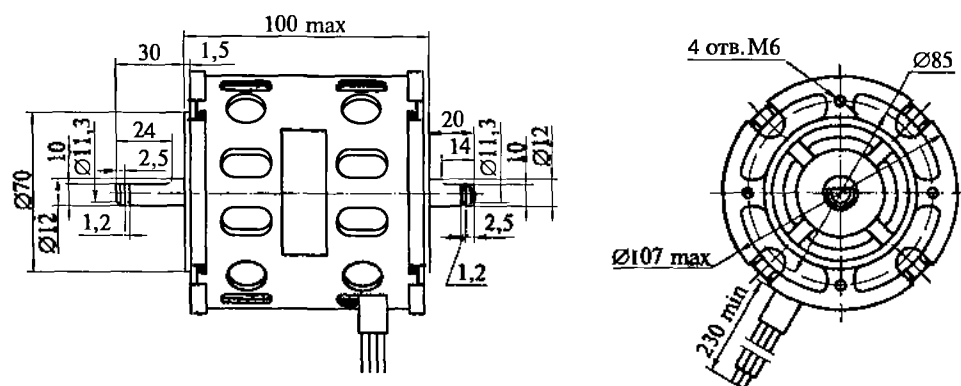


Рис. 6.7. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей ДАК 110-40-1,5

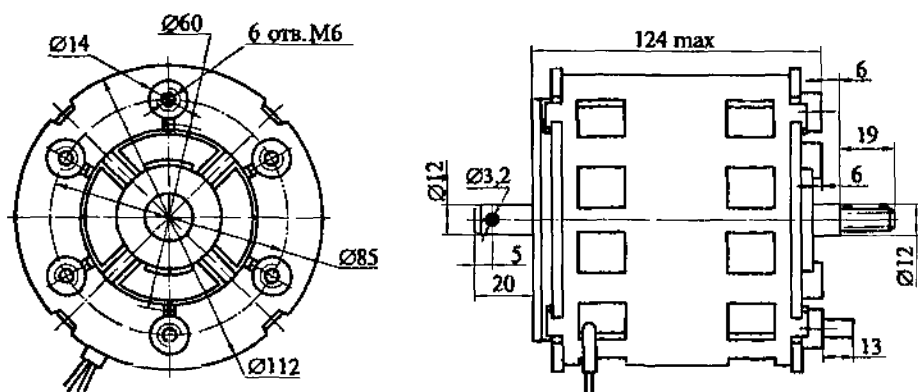


Рис. 6.8. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей ДАК 110-120-1,5M6

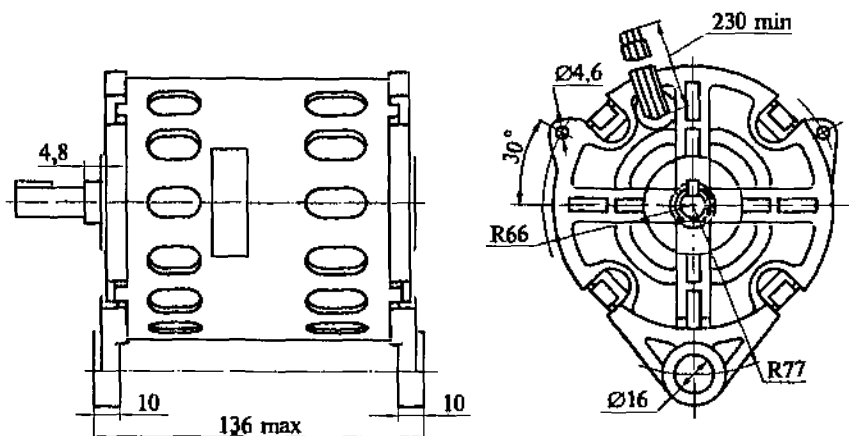


Рис. 6.9. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей ДАК 125-180-1,5 (крепление двигателя в месте его установки производится подвеской за две серьги $d = 16$ мм)

Конструкция двигателя. Статор явнополюсный с распределенной обмоткой и короткозамкнутым ротором. Двигатель крепится за подшипниковый щит со стороны выступающего конца вала либо за оба щита. Класс нагревостойкости изоляции В. Направление вращения ротора правое со стороны, противоположной выводным концам обмотки статора. Для изменения направления вращения ротора необходимо поменять местами провода одной из обмоток статора. Применяемые в схеме рабочие конденсаторы должны быть рассчитаны на напряжение 500 В.

4. Двигатели асинхронные однофазные с экранированными полюсами серии ДАО применяются в приводах ручесушителей, воздухоочистителей и других устройств с вентиляторной нагрузкой, не требующих значительно го пускового момента.

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии ДАО:

ДАО 73 X X X X X X X X X X
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

1 — ДАО — двигатель асинхронный однофазный, габаритный размер статора 73 мм;

2 — номинальная мощность двигателя, Вт;

3 — синхронная частота вращения, 10^3 об/мин;

4 — тип статора СОб — явнополюсный с сосредоточенной обмоткой и экранированными полюсами;

5 — тип ротора РО1 — короткозамкнутый;

6 — исполнение по способу вентиляции — естественное охлаждение (без обозначения) или самовентиляция (обозначается X);

7 — исполнение по способу монтажа: с двумя выступающими концами вала (обозначается IM3042);

8 — исполнение по дополнительному признаку: двухскоростной со ступенча-

тым регулированием частоты вращения ДЗ3;

9 — климатическое исполнение (УХЛ или О) и категория размещения 4;

10 — специальное исполнение на частоту тока 60 Гц и напряжение 115 В.

Режим работы двигателя продолжительный S1.

Конструкция двигателя. Статор двигателя явнополюсный с сосредоточенной обмоткой в виде цилиндрической катушки; ротор короткозамкнутый, вращается вместе с валом в подшипниках, установленных в подшипниковых щитах. Рабочее положение двигателя в пространстве горизонтальное. Направление вращения ротора правое; для исполнений ДАО 73-10-3 и ДАО 73-10-X — правое и левое. Исполнение двигателя по степени защиты IP00; класс нагревостойкости изоляции Е.

Принципиальная схема включения двигателя представлена на рис. 6.10. Технические данные двигателей серии ДАО 73 при питании от сети напряжением 220 В частотой 50 Гц приведены в табл. 6.29; габаритные и установочно-присоединительные размеры указаны на рис. 6.11 — 6.15.

5. Однофазные асинхронные двигатели с экранированными полюсами серии АД...Е применяются для привода бытовых устройств, не требующих большого пускового момента, например вентиляторов. Двигатели четырехполюсные, рассчитаны для включения в сеть напряжением 220 В частотой 50 Гц. Режим работы продолжи-

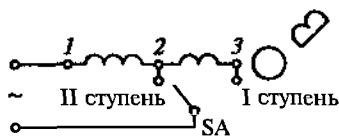


Рис. 6.10. Принципиальная схема включения двигателей типа ДАО 73

Таблица 6.29. Технические данные асинхронных однофазных двигателей с экранированными полюсами серии ДАО 73, работающими от сети напряжением 220 В и частотой 50 Гц

Параметр	Типоразмер			
	ДАО 73-10-3, ДАО 73-10-3-Х, ДАО 73-10-3- IM3042	ДАО 73-16-3-Х, ДАО 73-16-3- IM3042	ДАО 73-16-3-ДЗ3	
			I ступень	II ступень
Номинальное напряжение питания, В	—	220	—	—
Частота сети, Гц	—	50	—	—
Номинальная мощность, Вт	10	16	10	16
Частота вращения при номинальном вращающем моменте, об/мин	2450	2500	2550	2500
Потребляемый ток при номинальной мощности, А, не более	0,62	0,85	0,47	1,07
Коэффициент полезного действия, %	19	20	24	20
Отношение пускового вращающего момента к номинальному	0,80	0,80	0,95	0,85
Отношение максимального вращающего момента к номинальному	1,3	1,4	1,45	1,4
Средний уровень звука на расстоянии 1 м от корпуса, дБА:				
для исполнения без собственного вентилятора	37	37	—	33
для исполнения с собственным вентилятором	40	40	—	—
Среднее квадратическое значение виброскорости, мм/с	2,8	2,8	—	2,8
Масса, кг	0,9	1,2	—	1,2

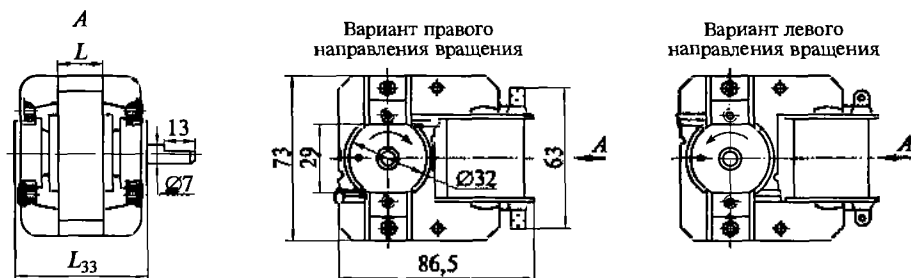


Рис. 6.11. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей ДАО 73

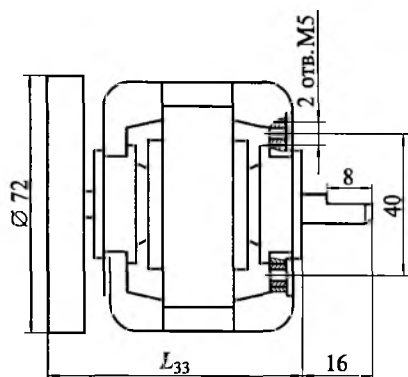


Рис. 6.12. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей ДАО 73-10-3-Х, ДАО 73-10-3,6-Х, ДАО 73-10-3-Х (левое вращение), ДАО 73-10-3,6-Х (левое вращение); $L_{33} = 77$ мм, $L = 27$ мм (см. рис. 6.11)

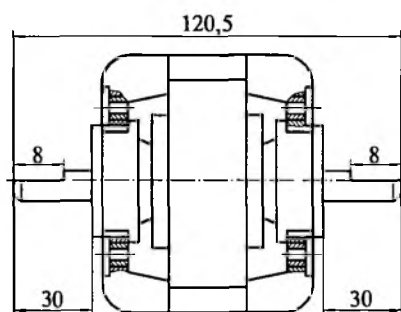


Рис. 6.13. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей ДАО 73-10-3-ИМ3042, ДАО 73-10-3,6-ИМ3042, ДАО 73-10-3,6-ИМ3042; $L_{33} = 77$ мм, $L = 27$ мм (см. рис. 6.11)

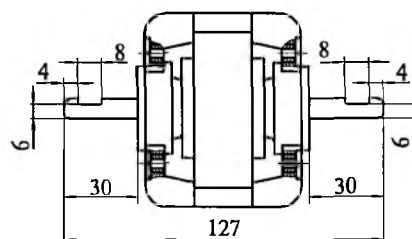


Рис. 6.14. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей ДАО 73-16-3-ИМ3042 и ДАО 73-16-3,6-ИМ3042; $L_{33} = 62$ мм, $L = 27$ мм (см. рис. 6.11)

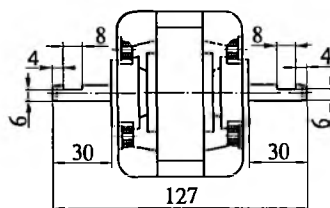
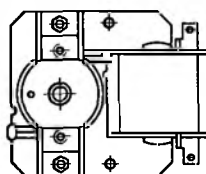
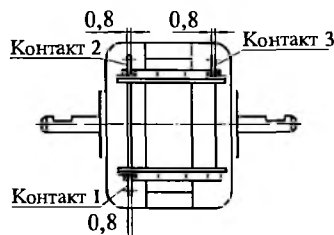


Рис. 6.15. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей ДАО 73-16-3-Д33 и ДАО 73-16-3,6-Д33; $L_{33} = 62$ мм, $L = 27$ мм (см. рис. 6.11)

Таблица 6.30. Технические данные однофазных асинхронных двигателей с экранированными полюсами отрезка серии АД...Е

Типоразмер	$P_{ном}$, Вт	$n_{ном}$, об/мин	$I_{ном}$, А	КПД	$M_n/M_{ном}$	Масса, кг
АД-2,5-4/40Е	2,5	1250	0,19	0,10	0,6	0,58
АД-4-4/40Е	4	1300	0,26	0,12	0,6	0,69
АД-6/4/40Е	6	1300	0,31	0,15	0,6	0,85
АД-10-4/45Е	10	1300	0,46	0,19	0,5	1,08
АД-16-4/45Е	16	1300	0,63	0,22	0,5	1,42
АД-25-4/45Е	25	1300	0,93	0,24	0,5	2,50

тельный S1. Технические данные двигателей серии АД...Е приведены в табл. 6.30.

6.7. Трехфазные асинхронные двигатели большой мощности высоковольтные

6.7.1. Трехфазные асинхронные двигатели серии А4

Двигатели серии А4 с короткозамкнутым ротором предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (компрессоры, вентиляторы, дымососы, насосы и т.п.). Номинальный режим работы продолжительный S1. Двигатели имеют защищенное исполнение IP23 и предназначены для эксплуатации в закрытых помещениях при температуре окружающего воздуха не более +40 °С. Двигатели являются высоковольтными, так как рассчитаны для включения в сеть напряжением 6 кВ или 10 кВ, частотой 50 Гц (табл. 6.31). Климатические условия эксплуатации и категория размещения двигателей УЗ. По желанию заказчика возможно изготовление двигателей на напряжение 3 кВ, но при этом ток статора возрастает в два раза по сравнению

с его значением при напряжении 6 кВ.

Вентиляция двигателей IC01 (внутренняя радиальная самовентиляция), воздух поступает в двигатель с его торцовых сторон, а выбрасывается наружу через боковые окна кожуха. Подшипниковые щиты отлиты из чугуна: подшипник со стороны рабочего конца вала роликовый, а с противоположной — шариковый. Смазка подшипников консистентная.

Коробка выводов обмотки статора, выполненная из листовой стали, допускает заливку концов подводимого кабеля компаундной массой. Обмотка статора соединена «звездой», и ее четыре вывода закреплены на изоляторах. Изоляция обмотки статора имеет нагревостойкость не ниже класса В, изоляция термореактивная типа «Монолит-2». Конструктивное исполнение по способу монтажа IM1001 (табл. 6.32).

Пуск двигателей прямой как при номинальном напряжении сети, так и при понижении напряжения сети до $0,8U_{ном}$. Допускается два пуска подряд из холодного состояния или один пуск из горячего состояния. Интервал между последующими пусками не менее 3 ч.

Двигатели допускают правое и левое направления вращения, однако

Таблица 6.31. Технические данные асинхронных двигателей серии А4

$P_{ном}$, кВт	n_1 , об/мин	$s_{ном}$, %	$I_{ном}$, А	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_p/M_{ном}$	$I_p/I_{ном}$	$U_{ном}$, кВ
400	1500	1,3	29; 47	94,2	0,87	2,3	1,0	5,7	10; 6
500	1500	1,3	58,0	94,7	0,88	2,3	1,0	5,7	6
630	1500	1,3	45; 72	95,1	0,88	2,3	1,2	5,7	10; 6
800	1500	1,2	57; 92	95,2	0,88	2,0	1,0	5,5	10; 6
1000	1500	1,2	71; 113	95,5	0,89	2,1	1,0	5,7	10; 6
315	1000	1,3	38,0	93,6	0,85	2,0	1,0	5,3	6
400	1000	1,3	47,5	94,0	0,86	2,0	1,0	5,3	6
500	1000	1,5	59,5	94,4	0,86	1,9	1,0	5,3	6
630	1000	1,4	74,5	94,7	0,86	1,9	1,0	5,3	6
800	1000	1,4	94,5	95,0	0,86	1,9	1,0	5,3	6
250	750	1,5	32,0	93,0	0,81	1,9	1,0	5,2	6
315	750	1,5	39,5	93,4	0,82	1,9	1,0	5,0	6
400	750	1,4	50,0	93,8	0,82	1,9	1,0	4,8	6
500	750	1,4	61,5	94,2	0,83	1,8	1,0	4,8	6
630	750	1,4	77,5	94,5	0,83	1,9	1,0	4,8	6
200	600	2,2	27,5	92,0	0,76	1,9	1,0	4,8	6
250	600	2,2	34,0	92,5	0,77	1,9	1,0	4,8	6
315	600	2,2	40,0	93,0	0,82	1,9	1,0	4,8	6
400	600	2,2	50,0	93,4	0,82	1,8	1,0	4,8	6

изменение направления вращения возможно только из неподвижного состояния ротора.

6.7.2. Трехфазные асинхронные двигатели серии ДАЗ04

По своему назначению двигатели серии ДАЗ04 аналогичны двигателям серии А4, т. е. они предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения, и работают от сети напряжением 6 и 10 кВ и частотой 50 Гц. Исполнение по способу монтажа IM1001, номинальный режим работы продолжительный S1 (табл. 6.33).

В отличие от двигателей серии А4 двигатели серии ДАЗ04 имеют закрытое исполнение по способу защиты IP54, поэтому они допускают эксплуатацию на открытом воздухе и в помещениях с повышенной влажностью и запыленностью при температуре окружающей среды от -40 до $+40$ °С. Способ охлаждения IC01A61 — двойная система вентиляции: наружный обдув и внутренняя самовентиляция по замкнутой системе с охлаждением воздуха в водяном охладителе, расположенном на корпусе двигателя. Контроль температуры обмотки осуществляется шестью полупроводниковыми датчиками температуры, заложенными в пазы статора. Испол-

1000	1500	900	1040	1420	760	110	1000	450	116	1410	205	2890
630	1000	900	1040	1420	760	110	900	450	116	1410	205	2620
800	1000	900	1040	1420	760	110	1000	450	116	1410	205	2940
400	750	900	1040	1420	760	110	900	450	116	1410	205	2540
500	750	900	1040	1420	760	110	1000	450	116	1410	205	2790
630	750	900	1040	1420	760	110	1000	450	116	1410	205	3070
315	600	900	1040	1420	760	110	900	450	116	1410	205	2450
400	600	900	1040	1420	760	110	1000	450	116	1410	205	2690
250	500	900	1040	1420	760	110	900	450	116	1410	205	2570
315	500	900	1040	1420	760	110	1000	450	116	1410	205	2790

нение по способу монтажа IM1001 (табл. 6.34).

Режим пуска и реверса у двигателей такой же, как и у двигателей А4. Число пусков в год не более 500. При выборе двигателя следует иметь в виду, что мощность двигателей серии ДАЗ04 при одинаковых габаритах с двигателями серии А4 на одну ступень меньше. Это объясняется закрытым исполнением двигателей ДАЗ04. Например, если при данных габаритах и частоте вращения мощность двигателя серии А4 равна 400 кВт, то при этих же габаритах и частоте вращения мощность двигателя серии ДАЗ04 равна 315 кВт.

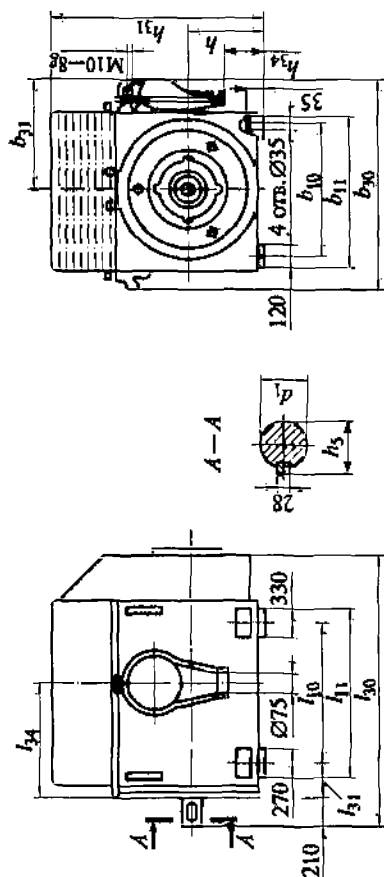
Сердечник статора двигателя имеет радиальные вентиляционные каналы и запрессован в станину между двумя нажимными шайбами. Пазы статора для надежной изоляции высоковольтной обмотки сделаны открытыми.

Сердечник ротора закреплен на валу рассматриваемого двигателя посредством шпонки и запрессован двумя нажимными шайбами по обе стороны пакета. Короткозамкнутая обмотка ротора выполнена сваркой из прямоугольных алюминиевых стержней и алюминиевых короткозамыкающих колец.

Таблица 6.33. Технические данные двигателей серии ДАЗ04

$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$s_{ном}$, %	$I_{ном}$, А	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$M_{пак}/M_{ном}$	$M_p/M_{ном}$	$I_p/I_{ном}$	$U_{I_{ном}}$, кВ
315	1500	1,1	23; 38	93,7	0,86	2,8	1,3	7,0	10; 6
400	1500	1,1	29; 47	94,2	0,87	2,8	1,3	7,0	10; 6
500	1500	1,1	36; 58,5	94,7	0,87	2,8	1,5	7,0	10; 6
630	1500	1,1	45; 74	94,7	0,87	2,5	1,2	7,0	10; 6
800	1500	1,1	57; 92	95,0	0,88	2,6	1,3	7,0	10; 6
250	1000	1,2	31,0	93,2	0,83	2,5	1,3	6,5	6
315	1000	1,2	38,0	93,9	0,85	2,5	1,3	6,5	6
400	1000	1,2	48,0	94,2	0,85	2,5	1,3	6,5	6
500	1000	1,1	60,0	94,4	0,85	2,4	1,3	6,5	6
630	1000	1,1	75,0	94,7	0,85	2,4	1,3	6,5	6
200	750	1,1	27,0	92,5	0,77	2,3	1,2	6,0	6
250	750	1,1	32,5	93,0	0,79	2,4	1,2	6,0	6
315	750	1,3	40,5	93,4	0,80	2,4	1,2	6,0	6
400	750	1,3	50,5	93,8	0,81	2,3	1,2	6,0	6
500	750	1,3	62,0	94,2	0,82	2,3	1,2	6,0	6
200	600	1,5	28,0	92,0	0,74	2,3	1,3	6,0	6
250	600	1,6	33,0	92,5	0,78	2,3	1,3	6,0	6
315	600	1,7	41,0	93,0	0,80	2,3	1,3	6,0	6
200	500	1,5	28,0	91,7	0,75	2,3	1,3	5,5	6
250	500	1,6	35,0	92,2	0,75	2,3	1,3	5,5	6

Таблица 6.34. Габаритные и установочные размеры двигателей серии ДА304



Мощность, кВт	Синхронная частота вращения, об/мин	Размеры, мм														Масса, кг
		b_{10}	b_{11}	b_{30}	b_{31}	d_1	i_{10}	i_{11}	i_{30}	i_{31}	t_{34}	h	h_5	h_{31}	h_{34}	
315	1500	800	940	1320	710	100	900	1150	1775	202	740	400	106	1270	100	2190
400	1500	800	940	1320	710	100	900	1150	1775	202	740	400	106	1270	100	2330
500	1500	800	940	1320	710	100	1000	1240	1875	202	840	400	106	1335	100	2630
630	1500	900	1040	1420	760	110	900	1190	1855	224	790	450	116	1415	205	2900
800	1500	900	1040	1420	760	110	1000	1290	1955	224	890	450	116	1480	205	3300
250	1000	800	940	1320	710	100	900	1140	1775	200	740	400	106	1270	100	2220
325	1000	800	940	1320	710	100	900	1140	1775	200	740	400	106	1270	100	2380
400	1000	800	940	1320	710	100	1000	1240	1875	200	840	400	106	1335	100	2650
500	1000	900	1040	1420	760	110	900	1190	1855	224	790	450	116	1415	205	2950
630	1000	900	1040	1420	760	110	1000	1290	1955	224	890	450	116	1415	205	3350
200	750	800	940	1320	710	100	900	1140	1775	200	740	400	106	1270	100	2340

Окончание табл. 6.34

Мощность, кВт	Синхронная частота вращения, об/мин	Размеры, мм											Масса, кг			
		b_{10}	b_{11}	b_{20}	b_{31}	d_t	l_{10}	l_{11}	l_{20}	l_{31}	l_{34}	h		h_5	h_{31}	h_{34}
250	750	800	940	1320	710	100	1000	1240	1875	200	840	400	106	1335	100	2610
315	750	900	1040	1420	760	110	900	1190	1855	224	790	450	116	1415	205	2870
400	750	900	1040	1420	760	110	1000	1290	1955	224	890	450	116	1480	205	3200
500	750	900	1040	1420	760	110	1000	1290	1955	224	890	450	116	1480	205	3470
200	600	800	940	1320	710	100	1000	1240	1875	200	840	400	106	1335	100	2590
250	600	900	1040	1420	760	110	900	1190	1855	224	790	450	116	1415	205	2770
315	600	900	1040	1420	760	110	1000	1290	1700	224	890	450	116	1415	205	2890
200	500	900	1040	1420	760	110	900	1190	1600	224	790	450	116	1415	205	2570
250	500	900	1040	1420	760	110	1000	1290	1700	224	890	450	116	1415	205	2790

ГЛАВА 7

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

7.1. Двигатели трехфазные асинхронные краново-металлургические серий МТФ, МТКФ, МТН и МТКН

Асинхронные крановые двигатели серий МТФ с фазным ротором и МТКФ с короткозамкнутым ротором предназначены для привода крановых и других механизмов, работа которых характеризуется кратковременным и повторно-кратковременным режимами и большими кратностями перегрузок.

Асинхронные металлургические двигатели серий МТН с фазным ротором и МТКН с короткозамкнутым ротором предназначены для приводов рабочих машин металлургического производства и других приводов, работающих при температуре окружающей среды, превышающей 40 °С.

Двигатели с короткозамкнутым ротором серий МТКФ и МТКН имеют повышенное скольжение и рассчитаны на прямой пуск от сети при номинальном напряжении. Краново-металлургические двигатели всех серий характеризуются повышенной перегрузочной способностью (от 2,3 до 3,5), большими пусковыми моментами при сравнительно небольших значениях пусковых токов, а также малым временем разгона.

Структура обозначения типоразмеров краново-металлургических двигателей серий:

<u>МТ</u>	<u>Х</u>	<u>Х</u>	<u>Х</u>	<u>Х</u>	<u>Х</u>	<u>Х</u>
1	2	3	4	5	6	7

1 — обозначение серии;

2 — буква К у двигателей с короткозамкнутым ротором, буква отсутствует в

обозначении двигателей с фазным ротором;

3 — класс нагревостойкости изоляции: F у двигателей крановых серий или H у двигателей металлургических серий;

4 — условная величина наружного диаметра пакета статора — габарит (от 0 до 7 для двигателей с фазным ротором МТФ и МТН и от 0 до 5 для двигателей с короткозамкнутым ротором МТКФ и МТКН);

5 — порядковый номер серии 1;

6 — условная длина пакета сердечника статора (1,2 или 3);

7 — число полюсов 2p (6, 8 или 10).

Крановые двигатели серий МТФ и МТКФ изготавливают в климатическом исполнении У, а металлургические двигатели серий МТН и МТКН в климатических исполнениях У, ХЛ, Т, О и категорий размещения при эксплуатации 1 или 2 (см. 2.5).

Допустимая температура окружающей среды от -45 до +40 °С для двигателей серий МТФ и МТКФ и от -45 до +50 °С для двигателей серий МТН и МТКН.

Краново-металлургические двигатели изготавливают на частоту переменного тока 50 Гц и напряжение питания 380/220 и 500 В. По желанию заказчика возможно изготовление на частоту 60 Гц при напряжении 380/220 и 440 В.

Номинальный режим работы повторно-кратковременный с относительной продолжительностью включения ПВ = 40 % (см. 2.7). Однако в технических данных крановых двигателей приведены параметры, соответствующие еще и ПВ 15, 25 и 60 %, а в технических данных металлургических двигателей приведены параметры, соответствующие еще и ПВ 25, 60 и 100 %.

		19,5	17,5	15	12	15	12	945 950 955 960	47,2 43,5 40,0 36,0	0,77 0,74 0,70 0,63	81,5 82,0 81,0 81,0	61,0 54,0 46,0 36,0	219	471	1,25	210	2500
MTF312-6		30	27	22	18	22	18	945 955 965 970	69,5 64,0 55,0 49,0	0,80 0,77 0,73 0,67	82,0 83,0 83,5 83,0	86,0 77,0 60,0 49,0	235	638	2,0	280	
MTF411-6		40	36	30	25	30	25	960 965 970 975	94,0 86,0 75,0 70,0	0,77 0,75 0,71 0,65	84,0 84,5 85,5 83,5	100,0 88,0 73,0 61,0	255	932	2,7	345	
MTF311-8		10,5	9	7,5	6	7,5	6	665 680 695 710	29,0 25,6 22,8 21,0	0,78 0,74 0,68 0,60	71,0 72,0 73,0 72,0	32,0 26,0 21,0 16,0	240	265	1,1	170	
MTF312-8		15	13	11	8,2	11	8,2	680 695 705 720	41,0 36,7 33,0 28,8	0,73 0,71 0,66 0,58	75,5 76,0 76,5 75,0	62,0 52,0 42,0 31,0	186	422	1,55	210	1900
MTF411-8		22	18	15	13	15	13	685 700 710 715	56,0 46,7 42,0 38,5	0,76 0,73 0,67 0,63	78,0 80,0 81,0 81,0	76,0 59,0 48,8 42,0	206	569	2,15	280	
MTF412-8		30	26	22	18	22	18	705 715 720 730	78,5 71,0 65,0 59,5	0,71 0,68 0,63 0,56	81,0 82,0 82,0 81,0	80,5 68,0 57,0 46,0	248	883	3,0	345	

Примечание. E_{20} — ЭДС (линейная) на выводах обмотки неподвижного фазного ротора при номинальном напряжении статора.

Таблица 7.2. Технические данные крановых двигателей серии МТКФ с короткозамкнутым ротором (380/220 В, 50 Гц)

Типоразмер	Мощность на валу, кВт, при				$n_{\text{ном}}$, об/мин	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$, %	$I_{\text{эл.м.}}$, А	$E_{\text{д}}$, В	$M_{\text{п.м.}}$, Н·м	GD^2 , кг·м ²	Масса, кг	$n_{\text{макс}}$, об/мин
	ПВ = = 15 %	ПВ = = 25 %	ПВ = = 40 %	ПВ = = 60 %										
					60 мин									
МТКФ011-6	2,0	1,7	1,4	1,2	1,2	780 835 875 900	0,81 0,74 0,66 0,61	56,0 60,0 61,5 61,0	41	41	15	0,08	47	
МТКФ012-6	3,1	2,7	2,2	1,7	1,7	785 835 880 915	0,82 0,77 0,69 0,60	61,5 65,0 67,0 65,0	66	66	22	0,11	53	
МТКФ111-6	4,5	4,1	3,5	2,8	2,8	860 880 900 920	0,79 0,78 0,74 0,66	69,0 71,5 73,0 73,0	103	102	40	0,18	70	
МТКФ112-6	6,5	5,8	5,0	4,0	4,0	865 880 910 940	0,80 0,79 0,73 0,67	70,0 72,0 74,0 74,0	162	152	53	0,26	80	2500
МТКФ211-6	10,5	9,0	7,5	6,0	6,0	845 870 895 920	0,83 0,81 0,77 0,69	68,0 72,5 75,5 78,0	216	206	78	0,44	110	
МТКФ311-6	14	13	11	9	9	880 895 910 930	0,82 0,80 0,76 0,69	76,0 76,5 77,5 77,5	383	373	130	0,85	155	
МТКФ312-6	19,5	17,5	15	12	12	900 915 930 945	0,83 0,82 0,78 0,71	79,0 80,0 81,0 81,0	589	579	205	1,2	195	

МТКФ411-6	30	27	22	18	22	18	22	905	67,0	0,85	80,0	853	785	315	1,9	255	2500
МТКФ412-6	40	36	30	25	30	25	910	88,0	0,84	81,5	1128	1079	460	2,55	315	2500	
МТКФ311-8	10,5	9	7,5	6	7,5	6	660	27,0	0,81	73,0	324	314	95	1,1	155	1900	
МТКФ312-8	15	13	11	8,2	11	8,2	675	36,8	0,77	76,5	500	461	150	1,55	195	1900	
МТКФ411-8	22	18	15	13	15	13	660	54,0	0,81	76,5	657	638	185	2,15	255	1900	
МТКФ412-8	30	26	22	18	22	18	675	74,0	0,78	79,0	981	932	295	3,0	315	1900	

Примечание $E_{\text{н}}$ — ЭДС (линейная) на выводах обмотки неподвижного фазного ротора при номинальном напряжении статора.

Таблица 7.3. Технические данные металлургических двигателей серии МТН с фазным ротором (380/220 В, 50 Гц)

Типоразмер	Мощность на валу, кВт, при					$n_{ном}$, об/мин	$I_{ном}$ при 380 В, А	$\cos \varphi_{ном}$	$\eta_{ном}$, %	$I_{здв}$, А	E_{20} , В	$M_{пик}$ Н·м	$G D^2$, кг·м ²	Масса, кг	$n_{пик}$, об/мин
	ПВ = 25 %	ПВ = 40 %	ПВ = 60 %	ПВ = 100 %	30 мин	60 мин									
МТН111-6	3,5	3,0	2,5	2,0	3,0	2,5	865 890 920 940	11,6 10,5 9,8 9,2	0,72 0,67 0,60 0,52	64,0 65,0 65,0 63,0	16,5 13,2 10,8 8,5	83	0,195	76	
МТН112-6	5,3	4,5	3,6	3,0	4,5	3,6	885 900 930 945	15,3 13,9 12,6 12,1	0,76 0,71 0,64 0,58	69,0 69,0 68,0 65,0	19,0 15,6 12,2 10,0	118	0,27	88	
МТН211-6	8,2	7,0	5,6	4,2	7,0	5,6	900 920 940 955	24,6 22,5 21,0 19,5	0,70 0,64 0,56 0,47	72,0 73,0 72,0 69,0	23,0 19,5 14,7 10,7	196	0,46	120	
МТН311-6	13	11	9	7	11	9	925 940 955 965	35,0 31,0 28,5 26,5	0,74 0,69 0,63 0,55	76,0 78,0 76,0 73,0	51,0 42,0 34,0 25,5	314	0,90	170	2500
МТН312-6	17,5	15	12	9	15	12	950 955 960 965	43,5 40,0 36,0 31,5	0,74 0,70 0,63 0,55	82,0 81,0 81,0 78,0	54,0 46,0 36,0 26,5	471	1,25	210	
МТН411-6	27	22	18	14	22	18	950 960 965 975	65,0 55,5 50,0 46,0	0,77 0,73 0,67 0,57	82,0 82,5 82,0 80,5	77,0 60,0 49,0 38,0	638	2,0	280	
МТН412-6	36	30	25	18	30	25	955 965 970 980	87,0 76,0 69,5 60,5	0,75 0,71 0,65 0,55	83,5 84,5 84,0 82,0	88,0 73,0 61,0 42,0	932	2,7	345	

Окончание табл. 7.3

Типоразмер	Мощность на валу, кВт, при					$n_{ном}$, об/мин	$I_{ном}$ при 380 В, А	$\cos \phi_{ном}$	$\eta_{ном}$, %	$I_{эл.м.}$, А	E_{20} , В	$M_{пзв}$, Н·м	$G D^2$, кг·м ²	Масса, кг	$n_{пзв}$, об/мин
	ПВ = 25 %	ПВ = 40 %	ПВ = 60 %	ПВ = 100 %	30 мин	60 мин									
МТН612-6	112	95	80	60	112	95	225 193 171 140	0,86 0,85 0,81 0,75	88,0 88,0 88,0 87,0	207 176 148 111	366	3532	16,5	920	2500
МТН613-6	140	118	94	70	140	118	278 237 198 164	0,86 0,84 0,80 0,73	89,0 90,0 90,0 89,0	190 160 128 95	473	4905	20,4	1090	2500
МТН611-10	53	45	36	28	53	45	128 112 98 90	0,76 0,72 0,66 0,56	83,0 84,0 85,0 85,0	185 154 123 94	185	2315	17	900	1500
МТН612-10	70	60	48	35	70	60	165 145 125 108	0,77 0,78 0,68 0,58	84,0 85,0 86,0 85,0	181 154 120 88	248	3139	21	1070	1500
МТН613-10	90	75	60	40	90	75	207 1080 157 132	0,76 0,72 0,66 0,53	87,0 88,0 88,0 87,0	179 145 114 76	320	4120	25	1240	1500
МТН711-10	125	100	80	65	125	100	287 246 216 195	0,74 0,69 0,63 0,57	89,5 89,5 89,0 88,5	294 233 180 147	272	4562	41	1550	1500
МТН712-10	155	125	100	80	155	125	355 300 262 235	0,75 0,70 0,65 0,58	88,5 90,3 89,0 88,5	295 237 185 146	327	5690	51	1700	1500

МТН713-10	200	160	125	100	200	160	578	458	0,73	90,5	305	408	7308	60	60	1900
							582	392	0,68	91,0	244					
							587	344	0,61	90,3	186					
							590	313	0,54	89,5	148					

Примечание. E_{20} — ЭДС (линейная) на выводах обмотки неподвижного фазного ротора при номинальном напряжении статора.

Таблица 7.4. Технические данные металлургических двигателей серии МТКН с короткозамкнутым ротором (380/220, 415/240, 400 и 500 В; 50 Гц)

Типоразмер	Мощность на валу, кВт, при					$I_{\text{ном}}$, об/мин	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$, %	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$I_{\text{н}}$ при 380 В, А	GD^2 , кг·м ²	Масса, кг	$n_{\text{полз}}$ об/мин
	ПВ = 25 %	ПВ = 40 %	ПВ = 60 %	ПВ = 100 %	30 мин									
МТКН111-6	3,5	3,0			3,0	890	10,5	0,75	67,5	97	40	0,18	70	
			2,5	2,0		910	9,5	0,7	68,0					
					2,5	930	8,8	0,63	68,0					
						945	8,3	0,55	65,5					
МТКН112-6	5,3	4,5			4,5	875	14,0	0,81	71,0	127	50	0,26	80	
			3,6	3,0		900	12,7	0,75	71,5					
					3,6	925	11,5	0,66	72,0					
						940	10,6	0,6	71,5					
МТКН211-6	8,2	7,0			7,0	875	23,2	0,75	71,5	225	88	0,44	110	2500
			5,6	4,2		895	20,8	0,7	73,0					
					5,6	920	18,5	0,62	74,0					
						940	16,5	0,53	73,0					
МТКН311-6	13	11			11	895	32,3	0,80	76,5	383	130	0,85	155	
			9	7		910	28,5	0,76	77,5					
					9	930	25,5	0,69	77,5					
						945	23,2	0,61	75,0					
МТКН312-6	17,5	15			15	915	40,5	0,82	80,0	579	205	1,2	195	
			12	9		930	36,0	0,78	81,0					
					12	945	31,5	0,71	81,0					
						960	28,0	0,61	80,0					

Окончание табл. 7.4

Типоразмер	Мощность на валу, кВт, при					$n_{\text{ном}}$, об/мин	$I_{\text{ном}}$, при 380 В, А	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$, %	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{кр}}$, Н·м	$I_{\text{кр}}$, при 380 В, А	$G D^2$, кг/м ²	Мас- са, кг	n_{max} , об/мин
	ПВ = 25 %	ПВ = 40 %	ПВ = 60 %	ПВ = 100 %	30 мин.	60 мин.									
МТКН411-6	27	22	18	14	22	18	915 935 950 960	0,83 0,79 0,73 0,65	81,0 82,5 82,5 81,5	785	853	315	1,9	255	2500
МТКН412-6	36	30	25	18	30	25	920 940 950 965	0,82 0,78 0,73 0,62	82,5 83,5 83,0 81,5	1079	1128	460	2,55	315	2500
МТКН311-8	9,0	7,5	6,0	4,5	7,5	6,0	670 690 705 715	0,77 0,71 0,62 0,51	74,0 73,5 73,5 73,0	314	324	95	1,1	155	1900
МТКН312-9	13	11	8,2	6,0	11	8,2	690 700 710 720	0,74 0,68 0,59 0,47	77,0 76,5 76,0 75,0	461	500	150	1,55	195	1900
МТКН411-8	18	15	13	10	15	13	680 695 705 715	0,77 0,71 0,67 0,58	78,5 80,0 81,0 79,5	638	657	185	2,15	255	1900
МТКН412-8	26	22	18	13	22	18	690 700 710 720	0,75 0,69 0,63 0,52	80,0 80,5 80,0 77,5	932	981	295	3,0	315	1900

МТКН511-8	34	28	23		34	28	680 695 705 715	79 67 57 49	0,82 0,77 0,73 0,67	80 83 84 84	1128	1128	336	4,3	440	1900
МТКН512-8	45	37	31		45	37	680 695 705 715	104 87 76 64	0,81 0,78 0,74 0,70	81 83 84 85	1472	1393	460	5,7	540	1900

Примечание. E_{20} — ЭДС (линейная) на выводах обмотки неподвижного фазного ротора при номинальном напряжении статора.

Таблица 7.5. Технические данные металлургических двигателей серии МТН с фазным ротором и независимой вентиляцией (380/220, 415/240 В; 50 Гц; ПВ = 100 %)

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$I_{ном}$, при 380 В, А	$\cos \varphi_{ном}$	$\eta_{ном}$, %	$I_{двиг}$, А	$E_{дв}$, В	$M_{ном}$, Н·м	Количество продуваемого воздуха, м ³ /мин	Статический напор, мм вод. ст.	GD^2 , кг·м ²	Масса, кг	n_{max} , об/мин
МТН511-8	28	715	70	0,72	84,0	64	281	1000	12	45	4,3	470	1900
МТН512-8	37	710	89	0,74	85,0	77	305	1373	14	85	5,7	570	1500
МТН611-10	45	570	112	0,72	85,0	154	185	2315	17	40	17,0	900	1500
МТН612-10	60	575	138	0,76	87,0	154	248	3139	20	55	21,0	1070	1500
МТН613-10	75	575	177	0,73	88,0	145	320	4120	23	75	25,0	1240	1500
МТН711-10	100	580	246	0,69	89,5	233	272	4562	28	35	41,0	1550	1500
МТН712-10	125	582	300	0,70	90,3	237	327	5690	34	50	51,0	1700	1500
МТН713-10	160	582	392	0,68	91,0	244	408	7308	40	70	60,0	1900	1500

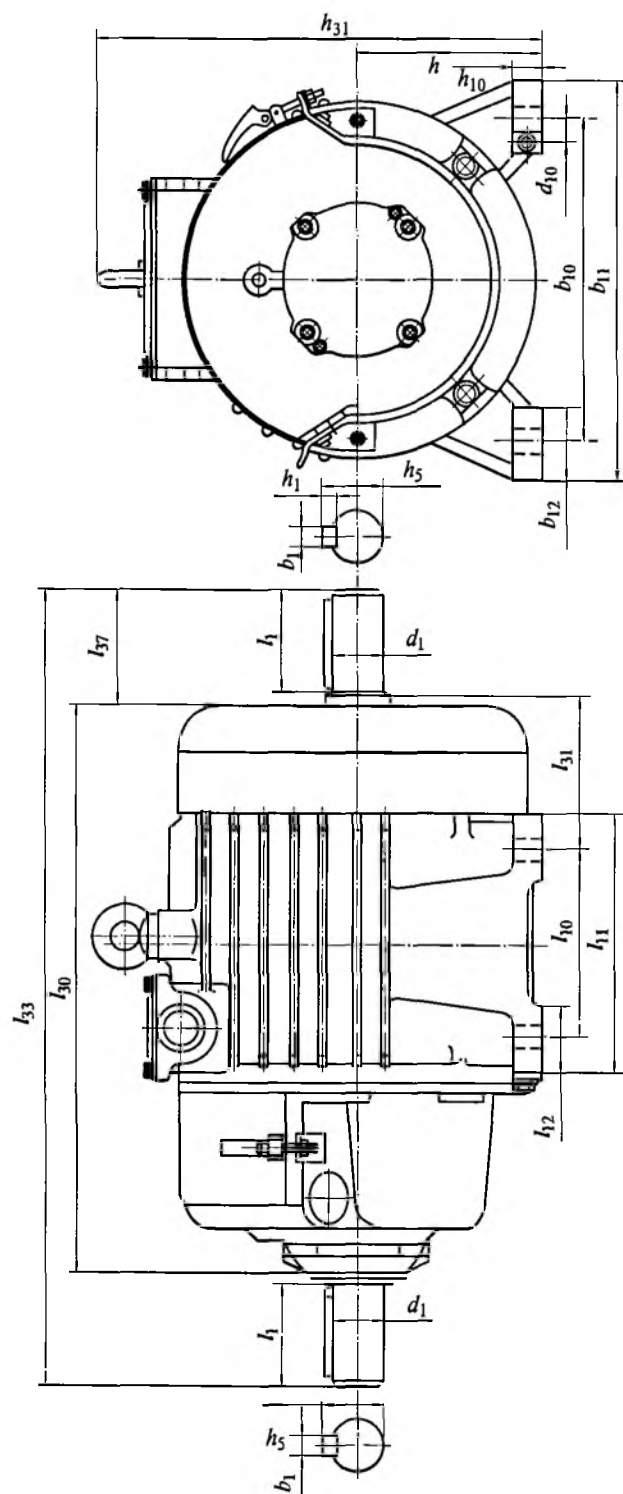


Рис. 7.1. Габаритные и установочно-присоединительные размеры асинхронных двигателей с фазным ротором серий МТФ и МТН горизонтального исполнения по способу монтажа IM1001 и IM1002

Таблица 7.6. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей серий МТГ и МТН (рис. 7.1)

Типоразмер	Размеры, мм																Цилиндрический											Конический																														
	b ₁	b ₄	b ₁₀	b ₁₁	b ₁₂	b ₂₁	d ₁	d ₁₀	h	h ₁	h ₅	h ₁₀	h ₃₁	h	h ₁	h ₂	h ₃₀	h ₃₁	h ₃₃	l ₃₇	b ₁	b ₄	b ₁₀	b ₁₁	b ₁₂	b ₂₁	d ₁	d ₁₀	h	h ₁	h ₅	h ₁₀	h ₃₁	h	h ₁	h ₂	h ₃₀	h ₃₁	h ₃₃	l ₃₇																		
МТГ011	8	180	230	50	133	28	19	112	7	31,0			302	60		150	200	515,5	132	585	64,5																																					
МТГ012																		550,5	127	620																																						
МТГ(Н)111	10	220	290	60	137	35		132	8	38,0		20	342	80		190	240	585,5	140	673	86,5																																					
МТГ(Н)112																235	285	623,5	135	713																																						
МТГ(Н)211	12	245	320	65	158	40		160		43,0			385			243	306	700,5	150	820	118,5																																					
МТГ(Н)311	14	280	350	75	176	50	24	180	9	53,5		23	444	110		260	320	748	155	859,5	118																																					
МТГ(Н)312																320	380	823	170	934,5																																						
МТГ(Н)411	16	330	440	90	198	65		225	11	63,75		26	527			335	395	677	175	1027	147																																					
МТГ(Н)412																420	480	952,5	165	1102																																						
МТН511	18	380	500	106	212	70		35	250	12	68,8	30	580	140	105	310	400	1014	251	1164	150																																					
МТН512																390	480	1114	271	1264																																						
МТН611																345	446	1152	256	1335	189																																					
МТН612	22	520	650	115	320	90	42	315	14	88,5		50	770	170	130	445	546	1252	256	1435																																						
МТН613																540	640	1347	256	1530																																						
МТН711																440	580	1423	323	1645	230																																					
МТН712	25	640	790	145	383	110	48	400	14	106,8		55	933	210	165	510	650	1493	323	1715																																						
МТН713																590	730	1573	323	1795																																						

Таблица 7.7. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей серий МТФ и МТН горизонтального исполнения на лапах и с фланцем по способу монтажа IM2001 и IM2002 (рис. 7.2)

Типоразмер	Размеры, мм																		
	b_1	b_{10}	b_{11}	b_{12}	d_1	d_7	d_8	d_{10}	d_{33}	h	h_1	h_5	h_{10}	h_{31}	h_{35}				
МТКФ011	8	130	230	50	28	—	—	19	28	112	7	31	20	302	110				
МТКФ012										132	8	38		342	125				
МТКФ(Н)111	10	220	290	60	35											160	43	385	130
МТКФ(Н)112																			
МТКФ(Н)211	12	245	320	65	40			24	28	35	180	9	53,5	23	444	155			
МТКФ(Н)311	14	280	350	75	50						225	11	63,75	26	527	190			
МТКФ(Н)312																			
МТКФ(Н)411	16	330	440	90	65	75	80				35	45	250	12	68,8	30	580	210	
МТКФ(Н)412																			
МТКН511	18	380	500	106	70	86,5	95	35	45	250	12	68,8	30	580	210				
МТКН512																			

Типоразмер	Размеры, мм											Конеч вала	
	l_1	l_3	l_{10}	l_{11}	l_{12}	l_{30}	l_{31}	l_{33}	l_{49}	l_{58}	l_1		
МТКФ011	60	—	150	200	60	415,5	132	485	202,5	62	4	Цилин- дриче- ский	
МТКФ012			190	240		450,5	127	520	217,5	62			
МТКФ(Н)111	80		190	240		484,5	140	574	228,8	90,5	5		
МТКФ(Н)112			235	285	524,5	135	614	246	88,5				
МТКФ(Н)211	110		243	306	70	586	150	706	263	106	5,5		
МТКФ(Н)311			80	260	320	637	155	748,5	277,5	136			5
МТКФ(Н)312				320	380	712	170	823,5	322,5	133,5			5,5
МТКФ(Н)411	140	105	335	395	85	749	175	899	336	176	6	Кониче- ский	
МТКФ(Н)412			420	480		824	165	974	368,5	134			
МТКН511			310	400	110	865	251	1015	396	174	7		
МТКН512				390	480		965	271	1115	456			

Приведены также данные кратковременного режима продолжительностью 30 и 60 мин.

При работе двигателей в повторно-кратковременном режиме продолжительность цикла $t_{ц} = t_p + t_n$ не должна превышать 10 мин (ГОСТ 183—74).

Крановые и металлургические двигатели всех серий имеют одинаковую конструкцию и отличаются только обмоточными данными, видом изоляции и лакокрасочным покрытием.

Основное конструктивное исполнение по способу монтажа IM1001 —

горизонтальное на лапах с одним выводным цилиндрическим или коническим (для габаритов 4, 5, 6 и 7) концом вала. Двигатели с 0 по 5-й габариты могут быть изготовлены по способам монтажа IM 2001 (на лапах и с фланцем с горизонтальным валом) и IM2011 (с вертикальным валом). Двигатели рассчитаны для работы в условиях повышенной запыленности, поэтому они имеют закрытое исполнение IP44 с внешним обдувом (способ самовентиляции IC0141). Для увеличения поверхности охлаждения наружная поверхность станин имеет продольные ребра. Так как двигатели рассматриваемых серий могут работать в условиях реверсирования, то их вентилятор имеет радиальное расположение лопаток, что обеспечивает ему одинаковую производительность при любом направлении вращения.

Станина и подшипниковые щиты двигателей чугунные. Двигатели с фазным ротором габаритов 5, 6 и 7 изготавливают в защищенном исполнении с независимой вентиляцией. Эти двигатели не имеют собственных вентиляторов, а охлаждающий воздух подводится со стороны, противоположной контактному кольцам, и направляется вдоль двигателя по внутренней полости и внешней поверхности станины вдоль ребер.

В двигателях, рассчитанных для включения в сеть на два напряжения 380/220 В, обмотка статора имеет шесть выводных концов и соединение фазных обмоток выполняется на клеммах коробки выводов. Обмотка ротора у двигателей с фазным ротором соединена «звездой» и имеет три вывода, присоединенных к контактному кольцам.

Технические данные двигателей приведены в табл. 7.1—7.5. Сведения

о габаритных и установочных размерах приведены на рис. 7.1 и 7.2 и табл. 7.6 и 7.7.

7.2. Двигатели трехфазные асинхронные крановые серий 4MT

Крановые двигатели серий 4MT(K)F112, 4MT(K)F132, 4MT(K)F160, 4MT(K)F200 предназначены для привода крановых и других механизмов, работа которых характеризуется кратковременным и повторно-кратковременным режимами работы и большими кратностями перегрузок. Крановые двигатели серий 4MT(K)H112, 4MT(K)H132, 4MT(K)H160, 4MT(K)H200 предназначены для привода механизмов металлургического производства, а также других приводов, работающих при повышенных температурах окружающей среды.

Структура обозначения типоразмеров двигателей серий 4MT:

X	X	X	X	X	X	X	X
1	2	3	4	5	6	7	8

- 1 — порядковый номер серии;
- 2 — обозначение серии;
- 3 — наличие буквы К — короткозамкнутый ротор, отсутствие буквы — фазный ротор;
- 4 — класс нагревостойкости изоляции: F (эксплуатация при температуре окружающей среды от -45 до $+40^{\circ}\text{C}$) или H (эксплуатация при температуре окружающей среды от -45 до $+50^{\circ}\text{C}$);
- 5 — наличие буквы Ф указывает на защищенное исполнение IP20 с независимой вентиляцией, отсутствие буквы указывает на закрытое исполнение со степенью защиты IP44 и самовентиляцию обдувом внешней поверхности;
- 6 — высота оси вращения 112, 132, 160, 200, 225, 280 мм;

Таблица 7.8. Технические данные крановых двигателей серий 4МТ(К)F(H) с фазным и короткозамкнутым (К) роторами с высотами осей вращения 112 и 132 мм на напряжение 380/220В частотой 50 Гц

Типоразмер	$P_{ном}$ при ПВ = 40 %, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$I_{ном}$ при 380 В, А	$\cos \varphi_{ном}$	$\eta_{ном}$, %	$I_{2ном}$, А	E_{20} , В	M_{max} , Н · м	n_{max} , об/мин
4МТ112L6	2,2	890	7,2	0,69	0,67	11,0	144	58	2500
4МТК112L6	2,2	880	6,8	0,74	0,67	—	—	64	
4МТ112LB6	3,7	910	11,2	0,72	0,70	13,8	190	100	
4МТК112LB6	3,7	920	10,7	0,72	0,73	—	—	110	
4МТ132L6	5,5	915	14,8	0,77	0,73	18,3	213	140	
4МТК132L6	5,5	900	13,6	0,81	0,76	—	—	158	
4МТ132LB6	7,5	935	18,4	0,78	0,79	20,7	242	195	
4МТК132LB6	7,5	905	18,0	0,82	0,78	—	—	230	

Примечание. E_{20} — ЭДС (линейная) на выводах обмотки неподвижного фазного ротора при номинальном напряжении статора.

Таблица 7.9. Технические данные крановых двигателей серий 4МТ(К)F(H) с фазным и короткозамкнутым (К) роторами с высотами оси вращения 160 и 200 мм на напряжение 380/220 частотой 50 Гц

Типоразмер	$P_{ном}$ при ПВ = 40 %, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$I_{ном}$ при 380 В, А	$\cos \varphi_{ном}$	$\eta_{ном}$, %	$I_{2ном}$, А	E_{20} , В	M_{max} , Н · м	n_{max} , об/мин
4МТ160L6	11,0	960	32	0,72	0,73	41	179	330	2500
4МТК160S6	11,0	940	30	0,76	0,73	—	—	400	
4МТ160LB6	15,0	960	39	0,76	0,77	48	213	470	
4МТК160M6	15,0	940	37	0,8	0,77	—	—	570	
4МТ160L8	7,5	710	25	0,67	0,68	22	227	250	1900
4МТК160S8	7,5	695	23	0,73	0,68	—	—	310	
4МТ160LB8	11,0	710	38	0,61	0,72	39	185	410	
4МТК160M8	11,0	700	34	0,68	0,72	—	—	510	
4МТ200L6	22,0	960	56	0,76	0,79	60	230	650	2500
4МТК200M6	22,0	935	51	0,83	0,79	—	—	870	
4МТ200LB6	30,0	965	76	0,74	0,81	73	255	950	
4МТК200L6	30,0	940	70	0,80	0,81	—	—	1150	
4МТ200L8	15,0	705	43	0,72	0,74	49	206	580	1900
4МТК200M8	15,0	695	40	0,77	0,74	—	—	670	
4МТ200LB8	22,0	715	66	0,66	0,77	57	248	900	
4МТК200L8	22,0	700	60	0,72	0,77	—	—	1000	

Примечание. E_{20} — ЭДС (линейная) на выводах обмотки неподвижного фазного ротора при номинальном напряжении статора.

6 — установочный размер по длине двигателя (S, M, L);

7 — число полюсов $2p$: 6, 8 или 10 для односкоростных двигателей; 6/20 или 6/12 для двухскоростных двигателей;

8 — климатическое исполнение (У, Т, УХЛ, О) и категория размещения (1; 2).

Двигатели изготавливают на напряжения 380/220 В, 660/380 В частотой 50 Гц. По требованию заказчика двигатели могут быть изготовлены на другие напряжения до 660 В частотой 50 или 60 Гц.

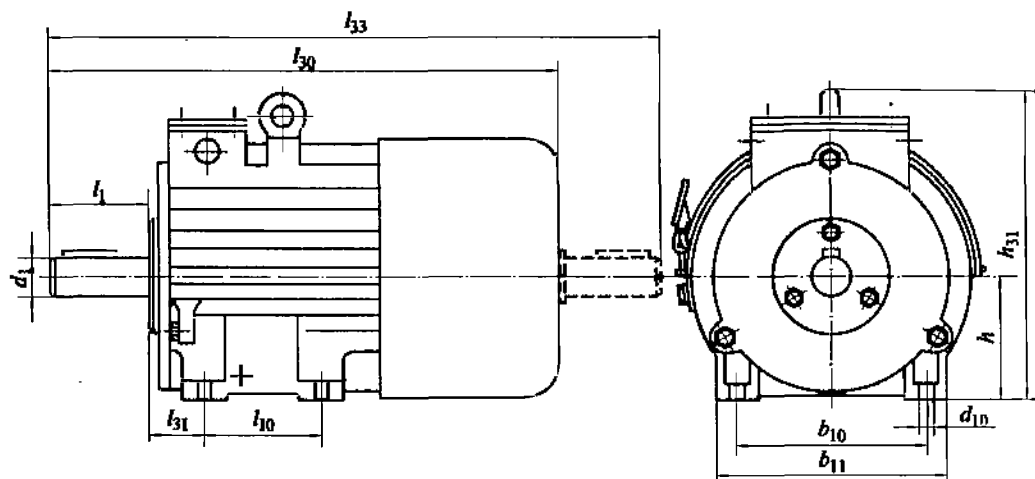


Рис. 7.3. Габаритные и установочно-присоединительные размеры асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии 4МТК с высотами осей вращения 112, 132, 160 и 200 мм исполнения по способу монтажа IM1001 и IM1002

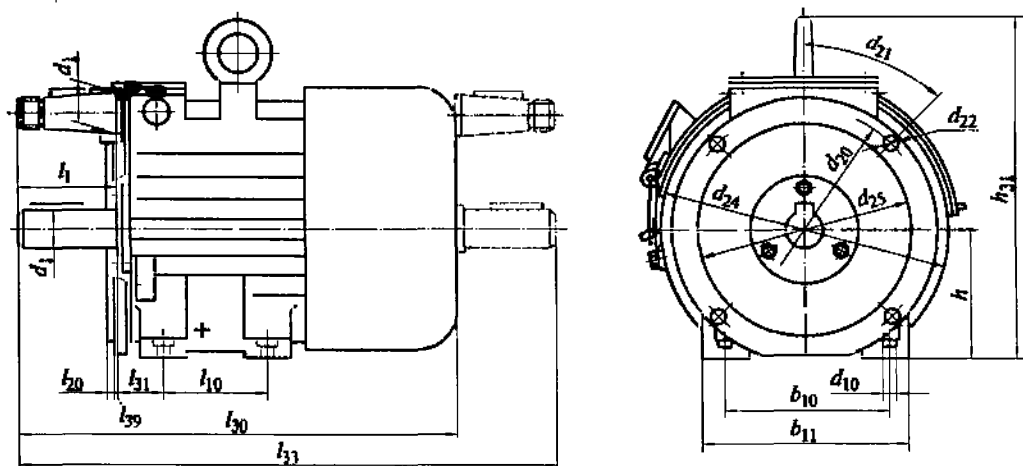


Рис. 7.4. Габаритные и установочно-присоединительные размеры асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии 4МТК с высотами осей вращения 112, 132, 160 и 200 мм исполнения по способу монтажа IM2001, IM2003, IM2011, IM2012, IM2013, IM2014

Таблица 7.10. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей 4МТ(К) с высотами оси вращения 112 и 132 мм исполнения по способу монтажа 1М1001 (рис. 7.3)

Типоразмер	Размеры, мм										Масса, кг
	b_{10}	b_{11}	d_1	d_{10}	h	h_{31}	h_i	h_{10}	h_{31}	h_{13}	
4МТ112Л	190	240	32	12	112	301	80	159	620	707	51
4МТК112Л	190	240	32	12	112	301	80	159	495	579	45
4МТ112ЛВ	190	240	32	12	112	301	80	159	620	707	63
4МТК112ЛВ	190	240	32	12	112	301	80	159	495	579	53
4МТ132Л	216	270	42	12	132	341	110	203	682	801	104
4МТК132Л	216	270	42	12	132	341	110	203	556	675	94
4МТ132ЛВ	216	270	42	12	132	341	110	203	682	801	115
4МТК132ЛВ	216	270	42	12	132	341	110	203	556	675	105

Таблица 7.11. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей 4МТ(К) с высотой оси вращения 112 и 132 мм исполнения по способу монтажа 1М2001 (рис. 7.4)

Типоразмер	Размеры, мм													Масса, кг
	b_{10}	b_{11}	d_1	d_{10}	d_{20}	d_{21}	d_{24}	d_{25}	h	h_{31}	l_1	l_{10}	l_{20}	
4МТ 112Л	190	240	32	12	215		250	180	112	301	80	159	4	53
4МТК112Л	190	240	32	12	215	4 отв	250	180	112	301	80	159	4	47
4МТ112ЛВ	190	240	32	12	215	Ø15	250	180	112	301	80	159	4	65
4МТК112ЛВ	190	240	32	12	215		250	180	112	301	80	159	4	55
4МТ132Л	216	270	42	12	300		350	250	132	341	110	203	5	110
4МТК132Л	216	270	42	12	300	4 отв	350	250	132	341	110	203	5	97
4МТ132ЛВ	216	270	42	12	300	Ø19	350	250	132	341	110	203	5	121
4МТК132ЛВ	216	270	42	12	300		350	250	132	341	110	203	5	108

Таблица 7.12. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей 4MT(K) с высотами осей вращения 160 и 200 мм исполнения по способу монтажа IM1001 (рис. 7.3)

Типоразмер	Размеры, мм										Масса, кг
	b_{10}	b_{11}	b_{21}	d_1	d_{10}	h	h_{31}	l_1	l_{10}	l_{20}	
4MT160L	254	310	358	48	15	160	424	110	254	754	165
4MT160LB	254	310	358	48	15	160	424	110	254	824	194
4MTK160S	254	310	358	48	15	160	424	110	178	599	155
4MTK160M	254	310	358	48	15	160	424	110	210	669	185
4MT200L	318	380	422	65	19	200	500	140	305	880	270
4MT200LB	318	380	422	65	19	200	500	140	305	955	320
4MT200M	318	380	422	65	19	200	500	140	267	742	253
4MT200L	318	380	422	65	19	200	500	140	305	817	302

Таблица 7.13. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей 4MT(K) с высотами осей вращения 112 и 132 мм исполнения по способу монтажа IM2001, IM2003, IM2011, IM2012, IM2013 (рис. 7.4)

Типоразмер	Размеры, мм													Масса, кг
	b_{10}	b_{11}	d_1	d_{10}	d_{20}	d_{22}	d_{24}	d_{25}	h	h_{31}	l_1	l_{10}	l_{20}	
4MT160L	254	310	48	15	300		350	250	160	424	110	254	5	178
4MT160LB	254	310	48	15	300		350	250	160	424	110	254	5	201
4MTK160S	254	310	48	15	300		350	250	160	424	110	254	5	160
4MTK160M	254	310	48	15	300	8 отв.	350	250	160	424	110	254	5	190
4MT200L	318	380	65	19	400	Ø19	450	350	200	500	140	305	5	292
4MT200LB	318	380	65	19	400		450	350	200	500	140	305	5	357
4MTK200M	318	380	65	19	400		450	350	200	500	140	305	5	260
4MTK200L	318	380	65	19	400		450	350	200	500	140	305	5	309

Степень защиты двигателей IP44, коробки выводов — IP54.

По уровню шума двигатели соответствуют требованию 1-го класса по ГОСТ 16372—93.

Крановые двигатели серий 4МТФ и 4МТН (4МТКФ и 4МТКН) имеют одинаковую конструкцию и отличаются лишь классом нагревостойкости примененных в них изоляционных материалов и лакокрасочными покрытиями.

Основные технические данные двигателей указанных серий приведены в табл. 7.8 и 7.9, габаритно-установочные и присоединительные размеры указаны на рис. 7.3 и 7.4 и в табл. 7.10—7.13.

7.3. Серия двигателей для привода лифтов

Двигатели предназначены для привода пассажирских и грузовых лифтов в гражданских и промышленных зданиях. Двигатели имеют короткозамкнутый ротор с глубокими пазами или с двойной клеткой, что вызвано необходимостью плавного пуска и снижения пускового тока. По сравнению с двигателями общего назначения лифтовые двигатели имеют повышенную величину номинального скольжения.

Двигатели изготавливают двухскоростными с двумя обмотками на статоре с разным числом полюсов $2p$. При запуске двигатель включается на обмотку статора с меньшим числом полюсов (на большую синхронную частоту вращения) и лишь перед остановкой, с целью «притормаживания», всего на несколько секунд двигатель переключается на обмотку статора с большим числом полюсов (с меньшей синхронной частотой вращения). Эта мера позволяет «погасить» инерцию

движущихся частей системы и снизить скорость движения кабины лифта перед ее остановкой.

Двигатели для привода лифтов выполняют малошумными с повышенными требованиями к вибрации (категория R по табл. 2.16).

Двигатели изготавливают с высотами оси вращения 160, 180 и 200 мм. Исполнение по степени защиты IP23 с самовентиляцией или независимой вентиляцией. Крепление двигателей фланцевое (без лап); с одним или двумя выступающими концами вала.

Структура обозначения типоразмеров двигателей для привода лифтов:

<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>
1	2	3	4	5	6	7	8	9

1 — базовая серия 5А, АИ;

2 — исполнение по защите и способу охлаждения: буква Н — защищенное исполнение с самовентиляцией; буква Ф — защищенное исполнение с принудительной (независимой) вентиляцией;

3 — высота оси вращения, мм;

4 — размер по длине станины (S — меньший, М — средний);

5 — число полюсов показано дробью: 4/16, 4/24, 6/18, 6/24;

6 — буква Н — малошумное исполнение;

7 — буква Л — двигатель для привода лифтов;

8 — буква Б — двигатель со встроенными датчиками температурной защиты (может отсутствовать);

9 — климатическое исполнение и категория места размещения при эксплуатации.

Пример обозначения лифтового двигателя: 5АН180S4/16НЛБ УХЛ4.

В табл. 7.14 приведены технические данные двигателей для привода лифтов, выполненных на базе серии 5А с высотами осей вращения 160, 180 и 200 мм. Габаритные и установочно-присоединительные размеры показаны на рис. 7.5—7.7.

Таблица 7.14. Технические данные асинхронных двигателей для привода лифтов

Типоразмер	$P_{\text{ном}},$ кВт	$n_{\text{ном}},$ об/мин	$\eta_{\text{ном}},$ %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}},$ Н · м	$M_0/M_{\text{ном}}$	$I_0/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{т. макс}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{исл}}$	$J,$ кг · м ²	Масса, кг
$2p = 4/16, 1500/375 \text{ об/мин}$												
5АН160М4/16	3,55	1440	80	0,68	10,0	24	2,7—3,3	6,5	3,1—3,9	150	0,06	105
	—	330	—	—	8,0	—	≥1,9	2,0	3,1—3,9			
5АН180С4/16	6,0	1425	84	0,77	13,9	40	2,4—3,1	6,5	3,0—3,5	150	0,165	160
	—	330	—	—	12,0	—	≥1,9	2,0	3,0—3,5			
5АН180М4/16	7,5	1425	85	0,78	16,9	50	2,8—3,3	6,5	3,0—3,4	150	0,210	180
	—	330	—	—	15,2	—	≥2,0	2,0	3,0—3,4			
$2p = 4/24, n_1 = 1500/250 \text{ об/мин}$												
5АН(Ф)200М4/24	8,0	1410	85	0,89	16,0	54	2,4—3,0	6,5	2,6—3,1	$\frac{150^*}{200}$	0,55	$\frac{255^*}{267}$
	—	215	—	—	12,0	—	≥1,9	—	2,6—3,1			
5АН(Ф)200МВ4/24	12,0	1410	82,5	0,91	24,0	81	2,5—2,8	6,5	2,6—3,1	$\frac{150^*}{200}$	0,55	$\frac{255^*}{267}$
	—	210	—	—	19,5	—	≥2	2,6—3,1	—			
$2p = 6/24, n_1 = 1000/250 \text{ об/мин}$												
АИН180М6/24	4,5	910	81	0,75	11,2	47	2,5—3,0	5	2,8—3,2	150	0,21	182
	—	205	—	—	19,5	—	≥1,8	—	2,5—3,0			
$2p = 6/18, n_1 = 1000/333,3 \text{ об/мин}$												
5АН160С6/18	3,0	960	70	0,54	12,0	30	2,7—3,2	4,6	3,0—3,7	120	0,12	110
	—	293	—	—	13,0	—	≥2,1	—	≥2,1			

Примечание. В числителе указано допустимое количество пусков в 1 ч и масса двигателей с самовентиляцией, а в знаменателе — с независимой вентиляцией.

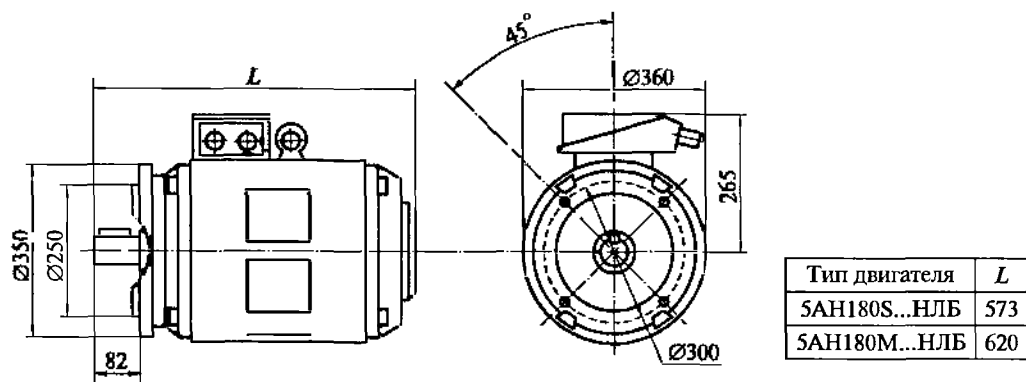


Рис. 7.5. Габаритные и установочно-присоединительные размеры асинхронных двигателей 5AH180HBL исполнения по способу монтажа IM3001

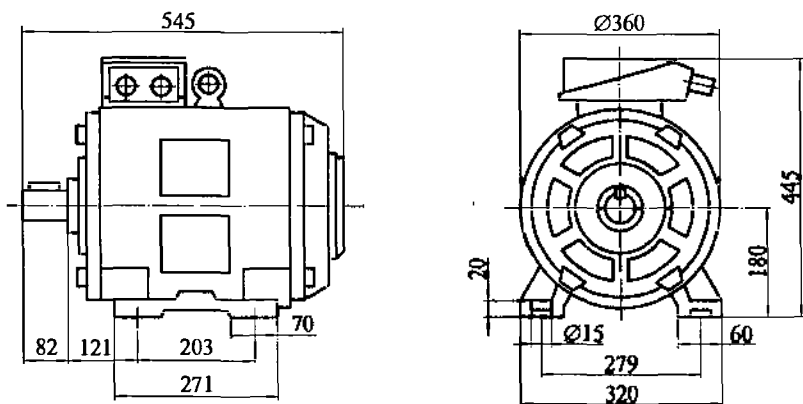


Рис. 7.6. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей AIN180HBL исполнения по способу монтажа IM1001

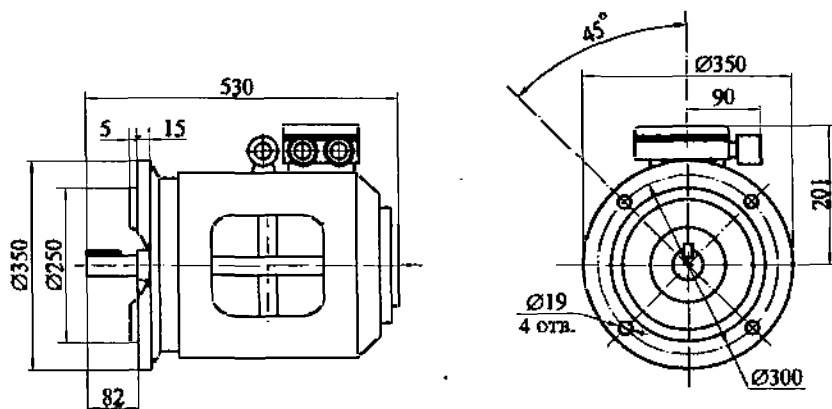


Рис. 7.7. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей 5AH160...HBL исполнения по способу монтажа IM3001

7.4. Взрывозащищенные двигатели

7.4.1. Основные понятия о взрывозащите электрооборудования

Для предотвращения пожара и взрыва от тепловых источников электрического происхождения электрооборудование, включая электрические машины, эксплуатируемые в пожаро- и взрывоопасных зонах, должно иметь конструкцию, исключающую возникновение пожаров и взрывов.

Взрывоопасной зоной называют помещение или пространство в помещении либо вокруг наружной установки, в котором имеются или могут образовываться взрывоопасные смеси. Помещение за пределами взрывоопасной зоны считают невзрывоопасным, если нет других факторов, создающих взрывоопасность. Взрывоопасные зоны разделяют на классы: В-I; В-Ia; В-Iб; В-Iг; В-II; В-IIa. Это деление зон взрывоопасности положено в основу выбора взрывобезопасного электрооборудования, в том числе электрических машин. Ниже приводится характеристика взрывоопасных зон перечисленных классов в соответствии с ПУЭ, гл. 7.3 [14].

Зоны класса В-I — зоны, расположенные в помещениях, в которых выделяют горючие газы или пары легко воспламеняемых жидкостей (ЛВЖ) в таком количестве и с такими свойствами, что они могут образовать с воздухом взрывоопасные смеси при нормальных режимах работы, например, при загрузке или разгрузке технологических аппаратов, хранении или переливании ЛВЖ, находящихся в открытых емкостях, и т. п.

Зоны класса В-Ia — зоны, расположенные в помещениях, в которых при нормальной эксплуатации взрывоопасные

смеси горючих газов (независимо от нижнего концентрационного предела воспламенения) или паров ЛВЖ с воздухом не образуются, а возможны только в результате аварий или неисправностей.

Зоны класса В-Iб — зоны, расположенные в помещениях, в которых при нормальной эксплуатации взрывоопасные смеси горючих газов или паров ЛВЖ с воздухом не образуются, а возможны только в результате аварий или неисправностей, и отличающиеся одной из следующих особенностей:

1) горючие газы в этих зонах обладают высоким нижним концентрационным пределом воспламенения (15 % и более) и резким запахом при предельно допустимых концентрациях по ГОСТ 12.1.005—76 (например, машинные залы аммиачных компрессорных и холодильных абсорбционных установок);

2) помещения производств, связанных с обращением газообразного водорода, в которых по условиям технологического процесса исключается образование взрывоопасной смеси в объеме, превышающем 5 % свободного объема помещения, имеют взрывоопасную зону только в верхней части помещения.

Взрывоопасная зона условно принимается от отметки 0,75 общей высоты помещения, считая от уровня пола, но не выше кранового пути, если таковой имеется (например, помещения электролиза воды, зарядные станции тяговых и стартерных аккумуляторных батарей). Пункт 2 не распространяется на электромашинные помещения с турбогенераторами с водородным охлаждением при условии обеспечения электромашинного помещения вытяжной вентиляцией с естественным побуждением; эти электромашинные помещения имеют нормальную среду.

К классу В-Iб относятся также зоны лабораторных и других помещений, в которых горючие газы и ЛВЖ находятся в количествах, недостаточных для создания взрывоопасной смеси в объеме, превышающем 5 % свободного объема помещения, и в которых работа с горючими газами и ЛВЖ производится без применения открытого пламени. Эти зоны не относятся к

взрывоопасным, если работа с горючими газами и ЛВЖ производится в вытяжных шкафах или под вытяжными зонтами.

Зоны класса В-Iг — пространства у наружных установок: технологических установок, содержащих горючие газы или ЛВЖ, надземных и подземных резервуаров с ЛВЖ или горючими газами (газгольдеры), эстакад для слива и налива ЛВЖ, открытых нефтеловушек, прудов-отстойников с плавающей нефтяной пленкой и т. п.

К зонам класса В-Iг также относятся: пространства у проемов за наружными ограждающими конструкциями помещений со взрывоопасными зонами классов В-I, В-Iа и В-II (исключение — проемы окон с заполнением стеклблоками); пространства у наружных ограждающих конструкций, если на них расположены устройства для выброса воздуха из систем вытяжной вентиляции помещений со взрывоопасными зонами любого класса или если они находятся в пределах наружной взрывоопасной зоны; пространства у предохранительных и дыхательных клапанов емкостей и технологических аппаратов с горючими газами и ЛВЖ.

Для наружных взрывоопасных установок взрывоопасная зона класса В-Iг считается в пределах до:

а) 0,5 м по горизонтали и вертикали от проемов за наружными ограждающими конструкциями помещений со взрывоопасными зонами классов В-I, В-Iа, В-II;

б) 3 м по горизонтали и вертикали от закрытого технологического аппарата, содержащего горючие газы или ЛВЖ; от вытяжного вентилятора, установленного снаружи (на улице) и обслуживающего помещения со взрывоопасными зонами любого класса;

в) 5 м по горизонтали и вертикали от устройств для выброса из предохранительных и дыхательных клапанов емкостей и технологических аппаратов с горючими газами или ЛВЖ, от расположенных на ограждающих конструкциях зданий устройств для выброса воздуха из систем вытяжной вентиляции помещений с взрывоопасными зонами любого класса;

г) 8 м по горизонтали и вертикали от резервуаров с ЛВЖ или горючими газами (газгольдеры);

д) 10 м по горизонтали и вертикали от места открытого слива и налива для эстакад с открытым сливом и наливом ЛВЖ.

Эстакады с закрытыми сливно-наливными устройствами, эстакады и опоры под трубопроводы для горючих газов и ЛВЖ не относятся к взрывоопасным, за исключением зон в пределах до 3 м по горизонтали и вертикали от запорной арматуры и фланцевых соединений трубопроводов, в пределах которых электрооборудование должно быть взрывозащищенным для соответствующих категорий и группы взрывоопасной смеси.

Зоны класса В-II — зоны, расположенные в помещениях, в которых выделяются переходящие во взвешенное состояние горючие пыли или волокна в таком количестве и с такими свойствами, что они способны образовать с воздухом взрывоопасные смеси при нормальных режимах работы (например, при загрузке и разгрузке технологических аппаратов).

Зоны класса В-IIа — зоны, расположенные в помещениях, в которых опасные состояния, указанные для зон класса В-II, не имеют места при нормальной эксплуатации, а возможны только в результате аварий или неисправностей.

Зоны в помещениях и зоны наружных установок в пределах до 5 м по горизонтали и вертикали от аппарата, в котором присутствуют или могут возникнуть взрывоопасные смеси, но технологический процесс ведется с применением открытого огня, раскаленных частей, либо технологические аппараты имеют поверхности, нагретые до температуры самовоспламенения горючих газов, паров или ЛВЖ, горючих пылей или волокон, не относятся в части их электрооборудования к взрывоопасным. Классификацию среды в помещениях или среды наружных установок за пределами указанной 5-метровой зоны следует определять в зависимости от технологических процессов, применяемых в этой среде.

Зоны в помещениях и зоны наружных установок, в которых твердые, жидкие и

газообразные горючие вещества сжигаются в качестве топлива или утилизируются путем сжигания, не относятся в части их электрооборудования к взрывоопасным.

Электродвигатели вентиляторов, включаемых перед началом работы котельной установки, и их пускатели, выключатели, если они размещены внутри помещений котельных установок, должны быть взрывозащищенными и соответствовать категории и группе взрывоопасной смеси.

При применении для окраски материалов, которые могут образовать взрывоопасные смеси, когда окрасочные и сушильные камеры располагаются в общем технологическом потоке производства, при соблюдении требований ГОСТ 12.3.005—75 зона относится к взрывоопасным в пределах до 5 м по горизонтали и вертикали от открытых проемов камер, если общая площадь этих камер не превышает 200 м² при общей площади помещения до 2000 м² или 10 % при общей площади более 2000 м².

При бескамерной окраске изделий в общем технологическом потоке на открытых площадках при условии соблюдения требований ГОСТ 12.3.005—75 зона относится к взрывоопасным в пределах до 5 м по горизонтали и вертикали от края решетки и от окрашиваемых изделий, если площадь решеток не превышает 200 м² при общей площади помещения до 2000 м² или 10 % при общей площади более 2000 м².

Если общая площадь окрасочных и сушильных камер или решеток превышает 200 м² при общей площади помещения до 2000 м² или 10 % при общей площади более 2000 м², размер взрывоопасной зоны определяется в зависимости от объема взрывоопасной смеси.

Помещение за пределами взрывоопасной зоны следует считать невзрывоопасным, если нет других факторов, создающих в нем взрывоопасность.

Пожароопасной зоной называют пространство внутри или вне помещения, в пределах которого постоянно или периодически образуются горючие вещества. В пожароопасных зонах могут применяться электрические ма-

шины напряжением до 10 кВ включительно при условии, что их оболочки имеют степень защиты не менее IP44. Если же в машине имеется источник возможного искрения (коллектор, контактные кольца), то степень защиты должна быть не менее IP54. Наряду с этим в пожароопасных зонах могут применяться электрические машины, вентилируемые по замкнутому циклу. Допускается использование машин, вентилируемых по разомкнутому циклу, при условии выброса отработанного воздуха за пределы пожароопасной зоны.

Взрывозащищенное электрооборудование подразделяют по уровням и видам взрывозащиты (табл. 7.15).

Применяют следующие **виды взрывозащиты** электрооборудования:

<i>Вид взрывозащиты</i>	<i>Обозначение</i>
Взрывонепроницаемая оболочка	<i>d</i>
Заполнение или продувка оболочки при избыточном давлении защитным газом ..	<i>p</i>
Искробезопасная цепь	<i>i</i>
Кварцевое заполнение оболочки с токоведущими частями	<i>q</i>
Масляное заполнение оболочки с токоведущими частями	<i>o</i>
Специальная взрывозащита	<i>s</i>
Защита типа «е»	<i>e</i>

Взрывоопасные смеси газов и паров с воздухом разделяют на категории, каждая из которых соответствует безопасному экспериментальному зазору (БЭМЗ) между фланцами электрической машины, через который взрыв не передается в окружающую среду при любой концентрации смеси в воздухе (табл. 7.16).

Взрывозащищенное оборудование подразделяют на группы, определяемые областями его применения:

Таблица 7.15. Уровни взрывозащиты электрооборудования

Уровень взрывозащиты	Характеристика
2	Электрооборудование повышенной надежности против взрыва, когда взрывозащита обеспечивается только при нормальном режиме работы
1	Взрывобезопасное электрооборудование, в котором защита обеспечивается как при нормальном режиме работы, так и при повреждениях, определяемых условиями эксплуатации, кроме повреждений средств взрывозащиты
0	Особовзрывобезопасное электрооборудование, отличающееся от взрывобезопасного наличием дополнительных средств взрывозащиты

Таблица 7.16. Категории взрывоопасных смесей газов и паров с воздухом

Категория смеси	Наименование смеси	БЭМЗ, мм
I	Рудничный метан	Более 1,0
II	Промышленные газы и пары	—
IIA	То же	Более 0,9
IIB	»	От 0,5 до 0,9
IIC	»	До 0,5

группа I — рудничное оборудование для работы в шахтах и рудниках;

группа II — для внутренней и наружной установки (кроме рудничного);

Группа II делится на подгруппы IIA, IIB и IIC, соответствующие категориям взрывоопасных смесей (см. табл. 7.16).

Взрывоопасные смеси паров и газов с воздухом в зависимости от температуры воспламенения разделяют на группы (табл. 7.17).

Температура самовоспламенения — это самая низкая температура горючей смеси, при которой происходит резкое увеличение скорости реакций,

Таблица 7.17. Группы взрывоопасных смесей газов и паров с воздухом по температуре самовоспламенения (температурный класс)

Группа	Температура самовоспламенения смеси, °C
T1	Более 450
T2	От 300 до 450
T3	От 200 до 300
T4	От 150 до 200
T5	От 100 до 135
T6	От 85 до 100

заканчивающееся возникновением пламенного горения.

Структура обозначения взрывозащищенности электрических машин:

X	X	X	X	X
1	2	3	4	5

1 — знак уровня взрывозащищенности: 2, 1 или 0 (см. табл. 7.15);

2 — Ex — знак, указывающий на соответствие взрывозащищенности двигателя действующим стандартам;

3 — знак вида взрывозащиты q , d и т.д. (см. с. 200);

4 — категория взрывоопасной смеси (см. табл. 7.16);

5 — знак температурного класса, т.е. группа взрывоопасных смесей газов и па-

ров с воздухом при температуре воспламенения, на которую рассчитана взрывозащищенность электрической машины (см. табл. 7.17).

Например, взрывозащищенность электродвигателя IExdIIATЗ означает:

I — уровень взрывозащищенности; Ex — взрывозащищенность соответствует действующим стандартам по взрывозащите; вид защиты *d* — «взрывонепроницаемая оболочка»; IIA — категория взрывоопасной смеси газов и паров с воздухом (промышленные газы и пары, БЭМЗ не более 0,9 мм); ТЗ — группа взрывоопасных смесей газов и паров с воздухом при температуре воспламенения, на которую рассчитана взрывозащищенность машины (от 200 до 300 °С).

7.4.2. Выбор электрических машин для взрывоопасных зон

1. Электрические машины, искрящие при нормальной работе (коллекторные или с контактными кольцами) рекомендуется выносить за пределы взрывоопасных зон, если это не вызывает особых затруднений при эксплуатации и не сопряжено с неоправданными затратами. Если же такая электрическая машина устанавливается в пределах взрывоопасной зоны, то она должна удовлетворять требованиям, соответствующим классу этой зоны (см. 7.4.1).

2. Взрывозащищенные электрические машины, используемые в химически активных, влажных или пыльных средах, должны быть также защищены от воздействия химически активной среды, сырости и пыли.

3. Взрывозащищенные электрические машины, используемые в наружных установках, должны иметь соответствующее климатическое исполнение и категорию размещения (см. 2.5), т. е. иметь защиту от атмосферных воз-

действий (дождя, снега, солнечной радиации и т. п.).

4. Электрические машины с защитой типа *e* допускается применять в электроприводах, где они не будут подвергаться перегрузкам, частым пускам и реверсам.

5. Взрывозащищенные электрические машины с типом защиты *d* (взрывонепроницаемая оболочка) в средах со взрывоопасными смесями категории IIC (см. табл. 7.16) должны быть установлены так, чтобы взрывонепроницаемые фланцевые зазоры не примыкали вплотную к какой-либо поверхности, а находились от нее на расстоянии не менее 50 мм.

6. Во взрывоопасных зонах классов ВII и ВIIа рекомендуется применять электрические машины, предназначенные для взрывоопасных зон со смесями горючих пылей или волокон с воздухом.

7. Электрические машины, применяемые для работы в средах взрывоопасных смесей газов и паров с воздухом, должны иметь температуру нагрева поверхности при работе с номинальной нагрузкой ниже температуры тления пыли для тлеющих пылей не менее чем на 50 °С или не более чем две трети температуры самовоспламенения для нетлеющих пылей.

8. Выбор электрических машин для работы во взрывоопасных зонах должен производиться по табл. 7.18. При необходимости допускается обоснованная замена электрических машин с уровнем защиты, соответствующей табл. 7.18, на электрические машины с более высоким уровнем взрывозащиты. Например, вместо электрической машины уровня «повышенная надежность против взрыва» можно применить машину уровня «взрывобезопасное».

Таблица 7.18. Допустимый уровень взрывозащиты или степень защиты оболочки электрических машин в зависимости от класса взрывоопасной зоны (см. 7.4.1)

Класс взрыво- опасной зоны	Уровень взрывозащиты или степень защиты
В-I	Взрывобезопасное, особовзрывобезопасное.
В-Ia, В-Iг	Повышенной надежности против взрыва для электрических машин, искрящих или подверженных нагреву свыше 80 °С. Без средств взрывозащиты для электрических машин, не искрящих и не подверженных нагреву свыше 80 °С. Исполнение по степени защиты не менее IP54.
В-Iб	Без средств взрывозащиты, оболочка со степенью защиты не менее IP44, включая искрящие части машин.
В-II	Взрывобезопасное или особовзрывобезопасное с соблюдением условий пп. 6 и 7.
В-IIa	Без средств взрывозащиты (при соблюдении условий пп. 6 и 7), но с оболочкой со степенью защиты не менее IP54, включая искрящие части машин.

Для электрических машин, применяемых во взрывоопасных зонах, допускается напряжение питания до 10 кВ.

Подробнее вопросы выбора электрических машин для взрывоопасных зон изложены в ПУЭ [14].

7.4.3. Двигатели асинхронные взрывозащищенные серии АИМР

Двигатели этой серии трехфазные с короткозамкнутым ротором изготавливают с высотой оси вращения 160 и 180 мм и предназначены для электропривода механизмов, работающих во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок всех классов согласно действующей нормативно-технической документации. Исполнение двигателей по взрывозащите (см. 7.4.1): I Exd IIBT4.

Двигатели рассчитаны для включения в сеть напряжением до 660 В, частотой 50 Гц; режим работы продолжительный S1; класс нагревостойкости изоляции не ниже F; климатиче-

ское исполнение: У, УХЛ и Т, категория места размещения при эксплуатации от 2 до 5. Исполнение по способу монтажа IM1081, IM2081 и IM3081.

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии АИМР:

<u>АИМР</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>
1	2	3	4	5

- 1 — обозначение серии;
- 2 — высота оси вращения (габарит): 160 или 180 мм;
- 3 — условная длина станины (S или M);
- 4 — число полюсов (2, 4, 6, 8);
- 5 — климатическое исполнение и категория места размещения.

Например, АИМР160М2У2 означает: взрывозащищенный асинхронный двигатель, габарит $h = 160$ мм, условная длина станины М, двухполюсный (при частоте тока 50 Гц $n_1 = 3000$ об/мин), для умеренного климата, категория размещения при эксплуатации 2.

Допускаемая температура окружающей среды от -50 до $+40$ °С. Номинальные значения основных параметров приведены в табл. 7.19, габарит-

**Таблица 7.19. Технические данные асинхронных взрывозащищенных двигателей
серии АИМР**

Типоразмер	$P_{\text{ном}},$ кВт	$n_{\text{ном}},$ об/мин	$s_{\text{ном}},$ %	$\eta_{\text{ном}},$ %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{н.м}}$	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{тmax}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{тmin}}/M_{\text{ном}}$	$J,$ кг · м ²
АИМР160S2	15,0	3000	89,5	0,88	2,6	6,5	2,1	2,4	1,4	0,044
АИМР160M2	18,5	3000	90,5	0,86	2,6	7,0	2,5	2,3	1,4	0,051
АИМР180S2	22,0	3000	91,0	0,89	2,5	6,9	2,5	3,0	1,4	0,075
АИМР180M2	30,0	3000	91,5	0,90	2,5	6,9	2,4	2,8	1,4	0,090
АИМР160S4	15,0	1500	90,0	0,85	2,5	6,3	2,2	2,5	1,2	0,087
АИМР160M4	18,5	1500	90,5	0,84	2,6	6,5	2,6	2,5	1,2	0,114
АИМР180S4	22,0	1500	91,2	0,85	2,0	6,5	2,2	2,5	1,3	0,173
АИМР180M4	30,0	1500	91,5	0,86	2,0	6,4	2,4	2,6	1,3	0,213
АИМР160S6	11,0	1000	88,0	0,83	3,0	6,5	2,0	2,5	1,2	0,140
АИМР160M6	15,0	1000	88,0	0,83	3,0	6,5	2,0	2,4	1,2	0,187
АИМР180M6	18,5	1000	89,5	0,83	2,5	5,7	2,0	2,3	1,2	0,320
АИМР160S8	7,5	750	85,0	0,70	3,3	5,5	1,7	2,8	1,2	0,140
АИМР160M8	11,0	750	86,0	0,72	3,3	5,0	1,5	2,2	1,2	0,187
АИМР180M8	15,0	750	87,0	0,72	3,3	6,0	2,1	2,2	1,2	0,320

**Таблица 7.20. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей
серии АИМР (рис. 7.8)**

Типоразмер	Размеры, мм															Масса, кг
	L ₁₀	L ₃₀	L ₃₁	b ₁	b ₁₀	d ₀	d ₁	d ₂₀	d ₂₄	d ₂₅	h	h ₁	h ₅	h ₃₁	h ₃₅	
АИМП160S2	178	690	108	12		350	42	300	350	250	160	8	45,0	495	245	150
АИМП160M2	210	730					165									
АИМП160S4	178	690					158									
АИМП160M4	210	730					180									
АИМП160S6	178	690		14		48					9	51,5			160	
АИМП160M6	210	730													185	
АИМП160S8	178	690													160	
АИМП160M8	210	730													185	
АИМП180S2	203	700	121		279	400	55	350	400	300	180	10	59,0	535	265	200
АИМП180M2	241	750														235
АИМП180S4	203	700														213
АИМП180M4	241	750														245
АИМП180M6	241	750					235									
АИМП180M8	241	750					235									

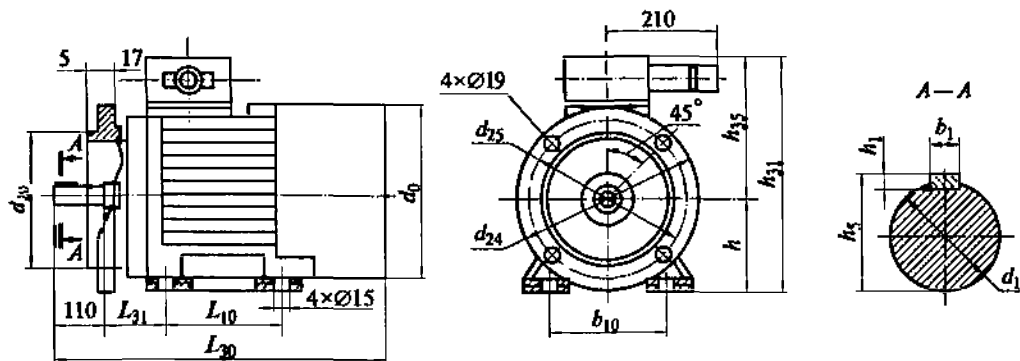


Рис. 7.8. Габаритные и установочно-присоединительные размеры асинхронных взрывозащищенных двигателей серии АИМР исполнения по способу монтажа IM2001

ные и установочно-присоединительные размеры представлены на рис. 7.8 и в табл. 7.20.

Исполнение по степени защиты: двигателей и коробок выводов IP54, кожухов вентиляторов IP20. Способ охлаждения IC0141. Двигатели имеют уровень взрывозащиты «взрывобезопасное» (см. табл. 7.18); вид взрывозащиты d (взрывонепроницаемая оболочка).

7.4.4. Двигатели асинхронные взрывозащищенные серии ВА

Асинхронные взрывозащищенные двигатели с короткозамкнутым ротором серии ВА имеют уровень защиты «взрывобезопасное» (см. табл. 7.18); вид взрывозащиты d (взрывонепроницаемая оболочка) и предназначены для эксплуатации во взрывоопасных зонах в условиях взрывоопасных смесей газов и паров с воздухом категории IIВ (см. табл. 7.16), и имеют степень взрывозащищенности IExdIIВТ4.

Двигатели серии ВА имеют изоляцию обмотки класса нагревостойкости F и предназначены для работы от сети переменного тока напряжением 380 или 660 В и частотой 50 Гц.

По заказу потребителей двигатели могут быть изготовлены на частоту тока 60 Гц.

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии ВА:

<u>ВА</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>
1	2	3	4	5

- 1 — обозначение серии;
- 2 — высота оси вращения (габарит): 180 или 200 мм;
- 3 — условная длина станины (S, M, L);
- 4 — число полюсов (2, 4, 6, 8);
- 5 — климатическое исполнение и категория места размещения.

Например, ВА200М4Т2 означает: взрывозащищенный асинхронный двигатель серии ВА, габарит $h = 160$ мм, условная длина станины М, четырехполюсный (при частоте тока 50 Гц $n_1 = 1500$ об/мин), для тропического климата, категория размещения при эксплуатации 2.

Исполнение по способу монтажа IM1081, IM2081, IM3081.

Допускаемая температура окружающей среды от -40 до $+40$ °С для исполнения У2, от -60 до $+40$ °С для исполнения УХЛ2, от -10 до $+45$ °С для исполнения Т2.

Режим работы продолжительный S1. Основные технические данные двигателей приведены в табл. 7.21.

Таблица 7.21. Технические данные взрывозащищенных асинхронных двигателей серии ВА

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$ при 380 В, А	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{в}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{в}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пв}}/M_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Масса, кг
$n_1 = 3000$ об/мин ($2p = 2$)											
ВА80МА2	1,5	2850	81,0	0,85	3,3	5,0	2,4	6,5	2,6	0,0018	40
ВА80МВ2	2,2	2850	82,0	0,86	4,7	7,4	2,5	6,5	2,6	0,0021	42
ВА132М2	11,0	2810	88,0	0,90	21,0	36,0	1,8	7,5	2,6	0,024	95
ВА200М2	37,0	2940	93,0	0,89	68,0	120,0	2,4	7,0	2,8	0,13	290
ВА200Л2	45,0	2950	93,0	0,89	82,0	146,0	2,4	7,0	2,8	0,15	310
$n_1 = 1500$ об/мин ($2p = 4$)											
ВА80МА4	1,1	1420	74,0	0,80	2,8	7,4	2,1	5,0	2,4	0,0034	40
ВА80МВ4	1,5	1410	75,0	0,81	3,7	10,0	2,1	5,0	2,4	0,0036	42
ВА32S4	7,5	1440	87,5	0,86	15,0	50,0	2,1	7,0	2,6	0,032	86
ВА132М4	11,0	1450	88,5	0,85	22,0	72,0	2,3	7,5	3,2	0,045	102
ВА200М4	37,0	1460	92,5	0,85	72,0	242,0	2,5	6,5	2,6	0,27	290
ВА200Л4	45,0	1460	92,5	0,85	87,0	294,0	2,5	6,8	2,6	0,32	315
$n_1 = 1000$ об/мин ($2p = 6$)											
ВА80МА6	0,75	930	71,0	0,70	2,3	7,7	2,0	4,5	2,2	0,0033	40
ВА80МВ6	1,1	930	71,0	0,71	3,3	11,0	2,0	4,1	2,2	0,0048	42
ВА132S6	5,5	960	85,0	0,80	12,0	55,0	2,0	6,5	2,4	0,048	85
ВА132М6	7,5	960	85,5	0,81	16,0	75,0	2,2	6,5	2,5	0,067	100
ВА200М6	22,0	975	90,0	0,84	44,0	215,0	2,2	6,0	2,2	0,41	280
ВА200Л6	30,0	975	90,0	0,84	60,0	294,0	2,2	6,0	2,2	0,46	305
$n_1 = 750$ об/мин ($2p = 8$)											
ВА132S8	4,0	720	81,5	0,70	10,0	53,0	1,9	5,0	2,3	0,053	85
ВА132М8	5,5	715	83,5	0,74	14,0	73,0	1,9	5,5	2,4	0,074	99
ВА200М8	18,5	735	90,5	0,76	42,0	240,0	2,0	6,4	2,6	0,41	280
ВА200Л8	22,0	730	91,0	0,78	49,0	288,0	2,0	6,0	2,5	0,46	305

7.4.5. Двигатели асинхронные взрывозащищенные рудничные серии ВПР

Двигатели данной серии предназначены для привода рабочих машин и механизмов в подземных выработках угольных и сланцевых шахт и в других местах эксплуатации опасных по газу (метану) и угольной пыли. Исполнение по уровню взрывозащиты — взрывобезопасное. Двигатели с короткозамкнутым ротором исполнения по защите IP54, способ охлаждения IC0141, изоляция обмотки класса нагревостойкости Н. Режим работы продолжительный S1, допускается повторно-кратковременный режим. Напряжение питания до 660 В частотой 50 или 60 Гц (по заказу потребителя). Климатическое исполнение УЗ. Исполнение по способу монтажа: IM1001, IM1002, IM3001, IM3002, IM4001, возможно специальное исполнение по заказу потребителя. Двигатели изготавливают с высотой оси вращения 160, 180, 200 и 225 мм и числом полюсов 2, 4, 6 и 8.

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии ВПР:

ВПР	X	X	X	X	X
1	2	3	4	5	6

1 — ВПР — взрывобезопасные для подземных работ рудничные;

2 — высота оси вращения (габарит): 160, 180, 200, 225 мм;

3 — условная длина станины (S, M или L);

4 — условная длина сердечника статора (A, B);

5 — число полюсов (2, 4, 6, 8);

6 — климатическое исполнение и категория места размещения.

Например, ВПР160М6 означает: двигатель взрывозащищенный, рудничный, для подземных работ, габарит $h = 160$ мм, условная длина станины М, шестиполюсный (при частоте тока 50 Гц $n_1 = 1000$ об/мин), для умеренного климата, категория размещения при эксплуатации 2.

Допускаемая температура окружающей среды от -45 до $+40$ °С в условиях умеренного климата и от -10 до $+45$ °С в условиях тропического климата.

Номинальный режим работы продолжительный S1, допускаются кратковременный и повторно-кратковре-

Таблица 7.22. Технические данные асинхронных двигателей серии ВПР

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	n_1 , об/мин	$\Delta_{ном}$, %	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$I_n/I_{ном}$	$M_n/M_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	J , кг · м ²
ВПР160S2	15,0	3000	2,6	89,5	0,89	6,0	1,8	2,5	0,064
ВПР160M2	18,5	3000	2,6	90,0	0,90	6,0	1,8	2,6	0,86
ВПР180S2	22,0	3000	2,0	90,0	0,89	6,9	2,0	2,7	0,118
ВПР180M2	30,0	3000	2,3	91,0	0,90	6,7	2,0	2,5	0,114
ВПР200M2	37,0	3000	1,6	91,5	0,86	7,0	1,9	2,6	0,260
ВПР200L2	45,0	3000	1,6	92,0	0,87	7,0	1,9	2,6	0,310
ВПР225M2	55,0	3000	2,0	92,5	0,86	7,0	2,3	2,7	0,420
ВПР160SA4	11,0	1500	2,6	89,5	0,85	6,0	2,2	2,4	0,098
ВПР160S4	15,0	1500	2,5	91,0	0,84	6,0	2,6	2,7	0,125
ВПР160M4	18,5	1500	2,6	90,5	0,85	6,5	2,3	2,6	0,161

Окончание табл. 7.22

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	n , об/мин	$\Delta_{ном}$, %	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$	$I_n/I_{ном}$	$M_n/M_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	J , кг·м ²
ВПР180S4	22,0	1500	2,3	90,0	0,86	5,5	2,4	2,5	0,257
ВПР180M4	30,0	1500	2,6	89,5	0,87	6,0	2,2	2,4	0,312
ВПР200M4P	37,0	1500	2,6	91,0	0,87	7,2	3,0	3,1	0,400
ВПР200L4P	45,0	1500	2,6	91,0	0,86	7,5	3,0	3,2	0,580
ВПР225M4P	55,0	1500	2,6	92,0	0,87	7,5	3,0	3,0	0,860
ВПР225МК4	55,0	1500	2,6	92,0	0,87	7,5	3,0	3,0	0,860
ВПР160SA6	7,5	1000	2,4	88,0	0,84	6,2	2,2	2,7	0,225
ВПР160S6	11,0	1000	2,4	88,0	0,83	6,2	2,1	2,6	0,225
ВПР160M6	15,0	1000	2,7	88,5	0,84	6,0	2,1	2,5	0,292
ВПР180M6	18,5	1000	3,0	90,0	0,83	6,0	2,0	2,6	0,325
ВПР200M6	22,0	1000	2,0	90,5	0,87	6,5	2,2	2,5	0,810
ВПР200L6	30,0	1000	2,0	91,0	0,87	6,5	2,2	2,5	0,920
ВПР225M6P	37,0	1000	2,0	90,0	0,87	6,5	2,0	2,4	1,450
ВПР160SA8	5,5	750	5,0	84,0	0,70	5,5	1,8	2,4	0,225
ВПР160S8	7,5	750	2,5	86,0	0,76	5,5	2,0	2,4	0,225
ВПР160M8	11,0	750	2,7	86,0	0,77	5,5	2,0	2,4	0,292
ВПР180M8	15,0	750	3,7	88,0	0,76	4,6	2,0	2,2	0,325
ВПР200M8	18,5	750	2,0	91,0	0,80	6,0	2,1	2,4	0,810
ВПР200L8	22,0	750	2,0	90,0	0,78	6,0	2,2	2,4	0,920
ВПР225M8	30,0	750	2,0	89,5	0,79	6,0	1,9	2,2	1,450

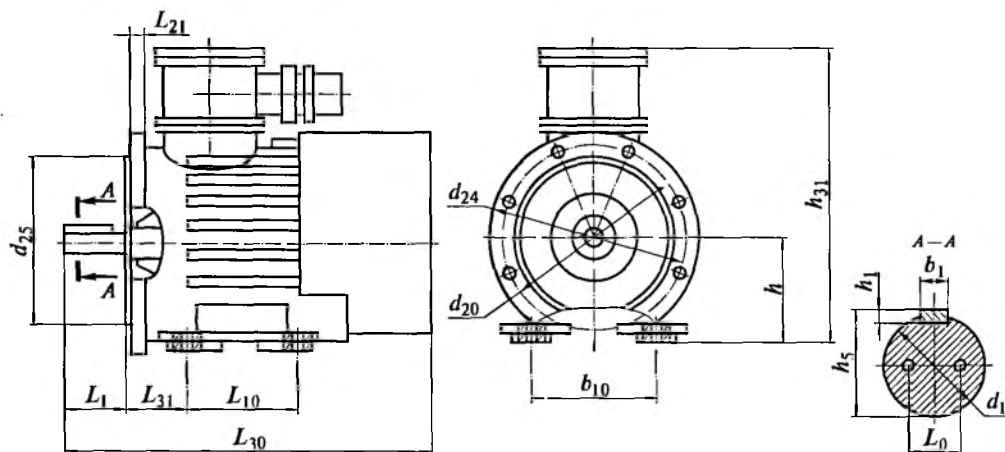


Рис. 7.9. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателя серии ВПР

Таблица 7.23. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателя серии ВПР

Типоразмер	Размеры, мм														Масса, кг		
	L ₀	L ₄	L ₁₀	L ₂₁	L ₃₀	L ₃₁	b ₁	b ₁₀	d ₁	d ₁₀	d ₂₄	d ₂₅	h	h ₁		h _s	h ₃₁
																	IM 1081
ВПР160S2	26	110	178	50	705	108	12	254	42	350	400	300	160	8	45,0	525	190
ВПР160M2	26	110	210	50	755	108	12	254	42	350	400	300	160	8	45,0	525	210
ВПР160SA4	32	110	178	50	705	108	14	254	48	350	400	300	160	9	51,5	525	195
ВПР160SA6, SA6; ВПР160B4, 6, 8	32	110	178	50	705	108	14	254	48	350	400	300	160	9	51,5	525	210
ВПР160M4,6,8	32	110	210	50	755	108	14	254	48	350	400	300	160	9	51,5	525	230
ВПР180S2	32	110	203	55	765	121	14	279	48	400	450	350	180	9	51,5	565	232
ВПР180M2	32	110	241	55	810	121	14	279	48	400	450	350	180	9	51,5	565	270
ВПР180S4	32	110	203	55	765	121	16	279	55	400	450	350	180	10	59,0	565	260
ВПР180M4, 6, 8	32	110	241	55	810	121	16	279	55	400	450	350	180	10	59,0	565	290
ВПР200M2	36	110	267	60	935	133	16	318	55	500	550	450	200	10	59,0	610	360
ВПР200L2	36	110	305	60	985	133	16	318	55	500	550	450	200	10	59,0	610	400
ВПР200M4P	36	140	267	60	1015	133	18	318	60	500	550	450	200	11	64,0	610	444
ВПР200L4P	36	140	305	60	1035	133	18	318	60	500	550	450	200	11	64,0	610	481
ВПР200M6, 8	36	140	267	60	875	133	18	318	60	500	550	450	200	11	64,0	610	360
ВПР200L6, 8	36	140	305	60	915	133	18	318	60	500	550	450	200	11	64,0	610	400
ВПР225M2	36	110	311	60	1015	149	16	356	55	500	550	450	225	10	59,0	660	500
ВПР225M4P	36	140	311	60	1045	149	18	356	65	500	550	450	225	11	69,0	660	530
ВПР225M6P; ВПР225M8	36	140	311	60	1045	149	18	356	65	500	550	450	225	11	69,0	660	500
ВПР225MK4	36	76	—	60	980	—	18	—	60	520	570	470	225	11	64,0	—	560

менные режимы. Степень защиты двигателей и коробок выводов IP54, кожухов вентиляторов наружного обдува — IP20. Исполнение двигателей по способу монтажа: при высоте оси вращения 160 и 180 мм — IM1081, IM4081, IM9781; при высоте оси вращения 200 и 225 мм — IM1001, IM4001, IM9701.

Корпус двигателя представляет собой стальную сварную конструкцию, состоящую из стальной трубы с приваренными к ней ребрами, лапами, коробки выводов. Подшипниковые щиты литые. Подшипник со стороны выходного конца вала — роликовый, с противоположной стороны — шариковый.

Основные технические данные двигателей приведены в табл. 7.22, габаритные и установочно-присоединительные размеры указаны на рис. 7.9 и в табл. 7.23.

7.4.6. Двигатели асинхронные взрывозащищенные серии ВАО

Двигатели трехфазные взрывозащищенные асинхронные обдуваемые с короткозамкнутым ротором серии ВАО изготавливают на напряжение 380 или 660 В (по желанию заказчика) частотой 50 Гц. Двигатели серии ВАО разработаны на базе двигателей общего назначения серии АО2. Диапазон мощностей двигателей ВАО от 0,27 до 100 кВт.

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии ВАО:

ВАО	X	X	X
1	2	3	4

1 — ВАО — взрывозащищенные асинхронные обдуваемые;

2 — номер наружного диаметра статора (габарит): от 0 до 9;

3 — номер длины пакета статора: 1 или 2;

4 — число полюсов: 2, 4, 6, 8, 10.

Например, ВАО81-8 обозначает: двигатель взрывозащищенный асинхронный, восьмого габарита, первой длины, число полюсов $2p = 8$ (синхронная частота вращения 750 об/мин).

В табл. 7.24 приведены технические данные двигателей серии ВАО основного исполнения, рассчитанные для работы в помещениях и наружных установках в средах взрывоопасных смесей групп Т1 — Т3. Изоляция обмотки статора класса В для двигателей габаритов 0—5 и класса Н для двигателей габаритов 6—9. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей серии ВАО основного исполнения приведены в табл. 7.25. Серия асинхронных двигателей ВАО имеет ряд *модификаций*: для взрывоопасных смесей до группы Т4 (см. табл. 7.17), химостойкие, крановые, многоскоростные и др.

7.5. Двигатели асинхронные погружные серий ПЭД, ПЭДВ, ПЭДП, ПЭДУ-103

Погружные электрические двигатели — это асинхронные двигатели специального назначения, работающие в условиях погружения в жидкость. При этом внутренняя полость двигателя заполнена жидкостью (водой или маслом), которая выполняет функцию охлаждающей среды и используется для смазки подшипников. Погружные двигатели работают в скважинах, представляющих собой сравнительно узкие каналы значительной протяженности. Поэтому в погружных двигателях требуемый рабочий объем создается за счет их увеличенной длины при сравнительно небольшом диаметре. По этой причине асинхронные погружные двигатели делают двухполюсными

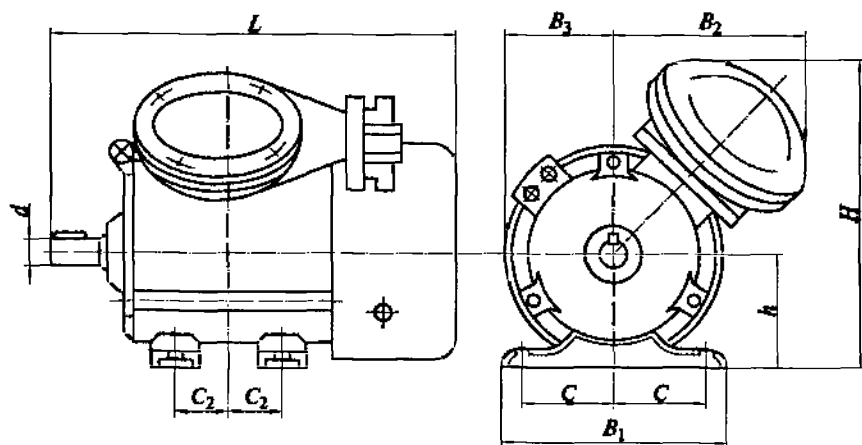


Рис. 7.10. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателя серии ВАО

Таблица 7.25. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей серии ВАО (основное исполнение) исполнения по способу монтажа IM1001

Типоразмер	Масса, кг	Размеры, мм								
		B_1	B_2	B_3	H	h	L	C	C_2	d
ВАО 071	20,0	155	155	85	235	80	300	62,5	50,0	14
ВАО 072	21,0	155	155	85	235	89	300	62,5	50,0	14
ВАО 11	25,0	180	165	90	255	90	330	70,0	50,0	14
ВАО 12	26,5	180	165	90	255	90	345	70,0	62,5	18
ВАО 21	29,0	205	210	110	230	100	340	80,0	56,0	22
ВАО 22	33,0	205	210	110	230	100	365	80,0	70,0	22
ВАО 31	42,0	240	225	125	255	112	365	95,0	57,0	28
ВАО 32	46,0	240	225	125	255	112	390	95,0	70,0	28
ВАО 41	88,0	270	240	145	395	132	520	108,0	70,0	32
ВАО 42	98,0	270	240	145	395	132	560	108,0	89,0	32
ВАО 51	125,0	312	240	165	440	160	610	127,0	89,0	38
ВАО 52	135,0	312	240	165	440	160	650	127,0	105,0	38
ВАО 61	160,0	330	240	185	485	180	630	139,5	101,5	42
ВАО 62	180,0	330	240	185	485	180	695	139,5	120,5	42
ВАО 71	250,0	388	350	220	570	200	675	159,0	114,0	48
ВАО 72	290,0	388	350	220	570	200	725	159,0	133,5	48
ВАО 81	385,0	485	350	255	650	250	845	203,0	155,5	60
ВАО 82	455,0	485	350	255	650	250	880	203,0	174,5	60
ВАО 91	670,0	560	470	320	600	280	1030	248,5	194,0	70
ВАО 92	780,0	560	470	320	600	280	1120	248,5	209,5	70

Таблица 7.26. Технические данные асинхронных погружных водонаполненных двигателей ПЭД, ПЭДВ, ПЭДП

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	Наружный диаметр, мм	$U_{ном}$, В	n_1 , об/мин	$\eta_{ном}$, %	Масса, кг
1ПЭДВ11-180	11	180	380	3000	83,50	79
1ПЭДВ13-180	13	180	380	3000	85,00	79
1ПЭДВ17-180	17	180	380	3000	86,00	97
ПЭДВ22-219У	22	219	380	3000	85,00	150
ПЭДВ32-219У	32	219	380	3000	86,50	175
ПЭДВ45-219У	45	219	380	3000	87,00	205
4ПЭДВ65-270У	65	270	380	3000	88,00	280
ПЭДВ250-320В5	250	320	3000	3000	89,00	1093
ПЭДВ500-375В5	500	375	3000	3000	88,50	1730
ПЭДВ-700-375В5	700	375	3000	3000	89,50	1820

ми, что при частоте тока в питающей сети 50 Гц соответствует синхронной частоте вращения $n_1 = 3000$ об/мин.

Двигатели асинхронные погружные водонаполненные с короткозамкнутым ротором серий ПЭД, ПЭДВ, ПЭДП предназначены для продолжительного режима работы S1 от сети переменного тока частотой 50 Гц в качестве приводов центробежных насосов на месторождениях рудных ископаемых и для закачки пластовых вод в нефтеносные горизонты.

Двигатели рассчитаны для работы в среде воды или в среде, заполненной сланцем. Температура окружающей среды от 1 до 40 °С.

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии ПЭД:

Х ПЭД Х Х Х Х
1 2 3 4 5 6

- 1 — шифр модернизации (1 или 4);
- 2 — ПЭД — погружной электродвигатель;
- 3 — буквы: П — для поддержания пластового давления; В — водонаполненный;
- 4 — мощность, кВт;
- 5 — диаметр корпуса двигателя, мм;

6 — климатическое исполнение У или В и категория размещения.

Конструктивное исполнение двигателей по способу монтажа ИМ3631.

Основные технические данные двигателей приведены в табл. 7.26.

Устройство двигателя. В стальную трубу, являющуюся корпусом двигателя, запрессован сердечник статора с обмоткой, выполненной из провода с полиэтиленовой водостойкой изоляцией, допускающей длительную работу в воде. Ротор двигателя состоит из вала, сердечника и короткозамкнутой обмотки, выполненной путем заливки пазов сердечника ротора алюминием и установкой на торцах замыкающих колец. Вал ротора полый, т.е. имеет центральное сквозное отверстие для циркуляции воды в полости двигателя.

Для улучшения условий охлаждения в двигателе предусмотрена циркуляция воды, для чего в верхней части вала ротора расположен насосный элемент. Обмотка ротора короткозамкнутая, выполненная заливкой пазов сердечника ротора алюминием и установкой на торцах замыкающих колец.

ГЛАВА 8

УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

8.1. Типовые схемы автоматического управления трехфазными асинхронными двигателями

Управление электрическими двигателями включает в себя следующие операции: пуск, торможение, остановку, реверсирование, регулировку или поддержание неизменными частоты вращения, момента, мощности и других рабочих параметров электропривода.

В зависимости от способа выполнения операции управления разделяют на ручные и автоматические.

При *ручном* управлении операции выполняются человеком (оператором) посредством аппаратов ручного управления: рубильников, переключателей, контроллеров, пусковых и регулировочных реостатов и т. п.

При *автоматическом* управлении участие человека (оператора) сводится к надзору за приборами управления на случай возникновения в них аварийных ситуаций; что же касается операций управления электродвигателем, то все они выполняются без участия человека.

Электродвигатель, управляющие и информационные устройства образуют систему, называемую электроприводом. Автоматические системы управления электроприводами разделяют на разомкнутые и замкнутые.

В *разомкнутой автоматической системе* управления элементы электропривода составляют *прямую цепь воздействий*, по которой осуществляется управление электроприводом в соответствии с поступившим на вход этой

цепи управляющим сигналом. Работа двигателя и других устройств электропривода происходит исключительно в соответствии с этим сигналом. Никакой информации о фактических значениях параметров в разомкнутой системе электропривода нет, а следовательно, и нет корректировки работы системы. Например, управляющим сигналом предусмотрена номинальная частота вращения вала двигателя. Однако из-за происшедшего падения напряжения в питающей сети по непредвиденным причинам частота вращения оказалась меньше номинальной. Вследствие этого фактическое положение исполнительного органа рабочего механизма не будет соответствовать заданному положению, предусмотренному управляющим сигналом. Отсутствие корректирующих мер может нарушить технологический процесс рабочей машины (механизма), управляемой данным электроприводом.

В *замкнутой автоматической системе* электропривода имеются цепи обратных связей, соединяющих выход системы электропривода с его входом. Информация о фактическом значении параметров по этим цепям передается на вход системы и корректирует соответствующим образом управляющий сигнал.

Рассматриваемые в данной главе разомкнутые схемы автоматического управления выполнены на релейно-контакторных элементах, применение которых в автоматическом электроприводе пока является наиболее распространенным, хотя и не всегда обеспечивает требуемую надежность.

Последнее обстоятельство зависит от качества изготовления релейно-контакторных устройств и правильного их выбора. Вместе с тем схемы с релейно-контакторными элементами отличаются простотой реализации и сравнительно невысокой стоимостью. Рассмотрим некоторые типовые схемы управления электроприводом. Все операции, связанные с включением и отключением различных элементов в рассматриваемых схемах, выполняются автоматически, т.е. без участия человека. Лишь только команды «Пуск» и «Стоп» в этих схемах выполняются человеком. Поэтому эти схемы более правильно следовало бы считать *полуавтоматическими*. Однако любая из этих схем, будучи включенной в систему автоматического регулирования (САР), становится *автоматической*, так как все команды по управлению, включая «Пуск» и «Стоп», будут выполняться в такой системе автоматически в соответствии с управляющими электрическими сигналами.

Рассматриваемые схемы выполнены с применением условных обозначений на элементы и буквенных кодов (приложение 2).

8.1.1. Схема управления пуском трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором посредством нереверсивного линейного контактора

При нажатии кнопки SB1 «Пуск» (рис. 8.1) замыкается цепь питания катушки линейного контактора KM1, который срабатывает и своими силовыми контактами KM1 подключает к сети обмотку статора асинхронного двигателя М. Одновременно замыка-

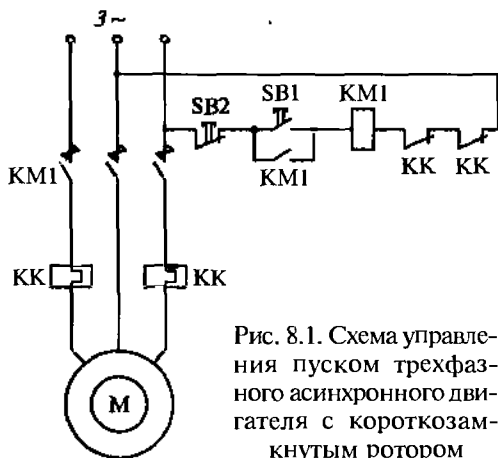


Рис. 8.1. Схема управления пуском трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

ются контакты KM1, шунтирующие кнопку SB1 «Пуск», чем обеспечивается питание обмотки контактора при отпускании этой кнопки. Отключение двигателя выполняется нажатием кнопки SB2 «Стоп». При этом размыкается цепь питания катушки контактора KM1, что приводит к размыканию всех его силовых контактов KM1, отключающих обмотку статора двигателя от сети, и контактов, шунтирующих кнопку SB1. При отпускании кнопки SB2 ее контакты замыкаются, но цепь катушки контактора KM1 остается разомкнутой.

В рассмотренной схеме управления применена защита двигателя от перегрузок посредством двух тепловых реле КК. Если двигатель перегружен и потребляемый им ток превышает допустимое значение, то выделяемая нагревательным элементом в КК теплота вызывает срабатывание одного из тепловых реле, при этом контакты КК размыкают цепь питания катушки линейного контактора KM1 и двигатель отключается от сети.

На примере рассмотренной схемы видим, что эта схема состоит из силовой цепи, через которую двигатель

получает питание, и управляющей цепи, содержащей элементы, управляющие силовой цепью. Управляющие цепи отличаются небольшим значением тока, а поэтому их питание может выполняться более низким напряжением, чем напряжение силовой цепи. В некоторых схемах управляющая цепь получает питание от сети постоянного тока. Применение пониженного напряжения в управляющих цепях целесообразно еще и по соображениям электробезопасности обслуживания.

8.1.2. Схема пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»

Для асинхронных двигателей, работающих при соединении обмотки статора «треугольником», с целью уменьшения пускового тока применя-

ют пуск двигателя переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник» (см. 4.7).

Перед пуском двигателя следует включить рубильник QS1 и автоматический выключатель QF1 (рис. 8.2). Затем нажатием кнопки SB1 включают контактор KM1, который своими силовыми контактами KM1 соединяет обмотку статора двигателя «звездой». При этом начинается разгон ротора двигателя при пониженном напряжении на фазных обмотках статора. Одновременно включается реле времени КТ, которое своими контактами КТ шунтирует кнопку SB1. С замедлением на срабатывание размыкаются контакты КТ в цепи катушки KM1 и контактор KM1 отключается. Одновременно замыкаются контакты КТ в цепи контактора KM2, который срабатывает и своими контактами KM2 соединяет обмотку статора двигателя «треугольником». Двигатель продолжает разгон, но при номинальном напряжении на фазных обмотках статора.

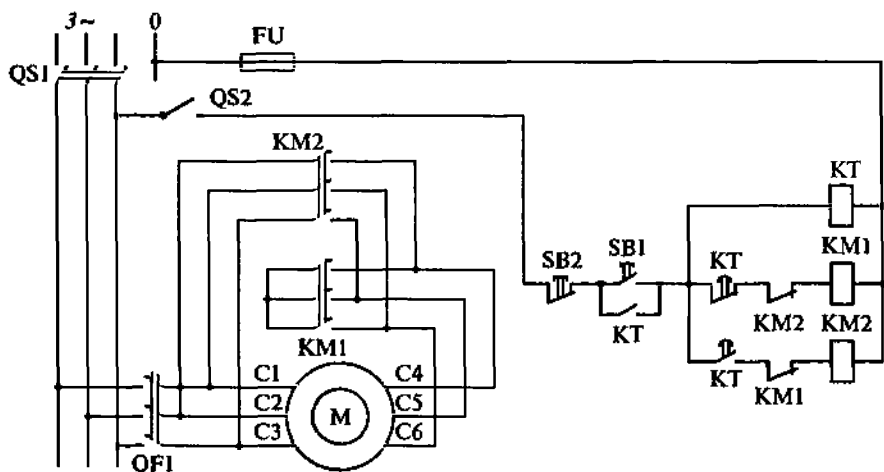


Рис. 8.2. Схема пуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»

8.1.3. Схема нереверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с динамическим торможением

При нажатии на кнопку SB1 «Пуск» (рис. 8.3) замыкается цепь питания катушки линейного контактора KM1, который срабатывает и своими силовыми контактами KM1 подключает двигатель М к трехфазной сети, а также подключает катушку реле времени динамического торможения КТ к источнику постоянного тока. При включении контактора KM1 размыкаются его контакты в цепи катушки контактора торможения KM2 и замыкаются контакты KM1, шунтирующие кнопку SB1 «Пуск». При срабатывании реле КТ замыкаются контакты КТ в цепи катушки контактора торможения KM2, но этот контактор не срабатывает, так как цепь его катушки остается разомкнутой контактами KM1.

Для остановки двигателя нажимают кнопку SB2 «Стоп». При этом прекращается питание катушки контактора KM1 и двигатель отключается от сети. Одновременно замыкаются контакты KM1 в цепи катушки контактора KM2, который срабатывает и своими контактами KM2 подключает обмотку статора двигателя к источнику постоянного тока, что приводит к динамическому торможению вращающегося по инерции ротора двигателя. Одновременно размыкаются контакты KM2 в цепи катушки линейного контактора KM1, что исключает его случайное включение.

Резистор R_r предназначен для ограничения постоянного тока в обмотке статора двигателя при динамическом торможении. Однако протекание постоянного тока в обмотке статора не-

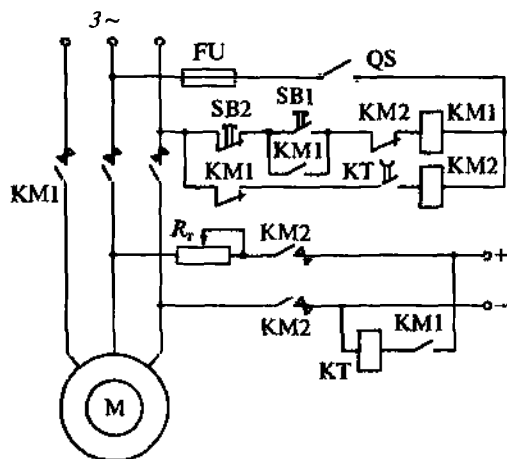


Рис. 8.3. Схема нереверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с применением динамического торможения

продолжительно, так как при отключении контактора KM1 размыкаются его контакты в цепи питания катушки реле времени КТ, что ведет к размыканию с некоторой временной задержкой контактов КТ в цепи питания катушки контактора торможения KM2. В результате обмотка статора двигателя контактами KM2 отключается от сети постоянного тока через некоторое время после отключения двигателя от трехфазной сети. Выдержка времени на размыкание контактов реле времени КТ устанавливается опытным путем с учетом времени, необходимого для торможения двигателя.

8.1.4. Схема реверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с применением торможения противовключением в функции скорости

Подключение двигателя к трехфазной сети возможно через две группы

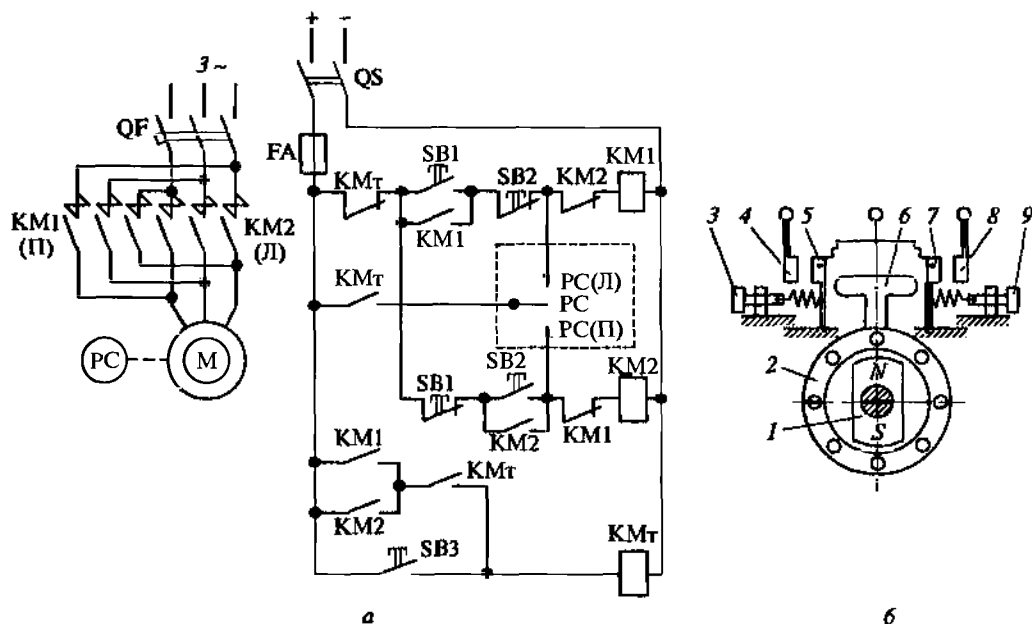


Рис. 8.4. Схема реверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с применением торможения противовключением в функции скорости (а) и устройство реле скорости (б)

силовых контактов (рис. 8.4): контакты $KM1(П)$, при замыкании которых ротор двигателя вращается в одном направлении («правое» вращение), и контакты $KM2(Л)$, при включении которых ротор вращается в другом направлении («левое» вращение). Схема содержит реле скорости PC , механически соединенное с валом двигателя M . Контакты этого реле $PC(П)$ и $PC(Л)$ включены в схему управления двигателем. Работа реле скорости (рис. 8.4, б), основными элементами которого являются постоянный магнит 1 и короткозамкнутая клетка 2, происходит следующим образом. При вращении постоянного магнита в стержнях этой клетки индуцируются токи, которые при взаимодействии с полем постоянного магнита создают электромагнитный момент, поворачивающий клетку в направлении вращения по-

стоянного магнита, т.е. в направлении вращения вала двигателя M . При этом клетка упором 6 воздействует на один из подвижных контактов 5 или 7. При вращении вала против часовой стрелки замыкаются левые контакты 4 и 5 [на схеме контакты $PC(Л)$], а при вращении по часовой стрелке — правые контакты 7 и 8 [на схеме контакты $PC(П)$].

Для включения двигателя на «правое» вращение (по часовой стрелке) нажимают двойную кнопку $SB1$. При этом замыкается цепь катушки линейного контактора $KM1$ и одновременно размыкаются контакты в цепи катушки линейного контактора $KM2$, исключая возможность случайного включения этого контактора, что привело бы к короткому замыканию в силовой части схемы двигателя.

При срабатывании линейного контактора КМ1 замыкаются его блокировочные контакты, шунтирующие кнопку SB1, и включаются силовые контакты КМ1(П), которые присоединяют обмотку статора двигателя к сети. Одновременно размыкаются контакты блокировочные КМ1, исключающие возможность включения контактора КМ2, и замыкаются контакты КМ1 в цепи реле торможения КМт. После пуска двигателя М срабатывает реле скорости РС и его средний контакт РС замыкается с крайним контактом РС(П) (на рис. 8.4, б замыкаются контакты 7 и 8).

Для остановки двигателя нажимают кнопку SB3 «Стоп». При этом замыкаются контакты, подключающие катушку реле торможения КМт, при срабатывании которого размыкаются его контакты КМт в цепи катушки контактора КМ1 и двигатель отключается от сети, продолжая вращение по инерции. Одновременно замыкаются контакты КМт в цепи реле торможения КМт и контакты КМт в цепи подвижного контакта реле скорости РС. Так как отключение контактора КМ1 вызвало замыкание контактов КМ1 в цепи катушки контактора КМ2, он включается (при этом ток проходит через контакты РС(П) реле скорости РС) и замыкает силовые контакты КМ2(Л). Возникший в двигателе вращающий момент «левого» вращения вызывает торможение двигателя противовключением. При уменьшении частоты вращения ротора двигателя до значения, составляющего 5—10 % от номинального, вращающий момент на короткозамкнутой клетке реле скорости РС уменьшается настолько, что под действием пружины контакты 7 и 8 РС(П) размыкаются, катушка контактора КМ2 отключает-

ся и процесс торможения прекращается. Это исключает возможность реверсирования двигателя при торможении противовключением. Настройку частоты вращения ротора двигателя, при которой размыкаются контакты реле скорости РС, выполняют регулировкой сжатия пружин реле посредством винтов 3 и 9 (см. рис. 8.4, б).

Если при работе двигателя М с «правым» вращением ротора потребуется его реверсирование, то нажимать кнопку SB3 «Стоп» не следует. Для этого достаточно нажать двоящую кнопку SB2. При этом размыкаются контакты в цепи катушки контактора КМ1 и замыкаются контакты в цепи контактора КМ2. В итоге разомкнутся силовые контакты КМ1(П) и замкнутся силовые контакты КМ2(Л), изменится порядок следования фаз на обмотке статора и произойдет реверсирование двигателя. Если после этого потребуются остановка двигателя, то необходимо нажать кнопку SB3 «Стоп», что вызовет процесс торможения противовключением.

8.1.5. Схема нереверсивного управления двухскоростным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором и двумя обмотками на статоре с разным числом полюсов

После включения автоматов QF1 и QF2 нажимают двоящую кнопку SB1 (рис. 8.5). При этом срабатывает контактор КМ1, который своими контактами размыкает цепь катушки контактора КМ2, чтобы исключить возможность случайного включения этого контактора, что привело бы к аварии, и включает в трехфазную сеть обмотку статора с меньшим числом полю-

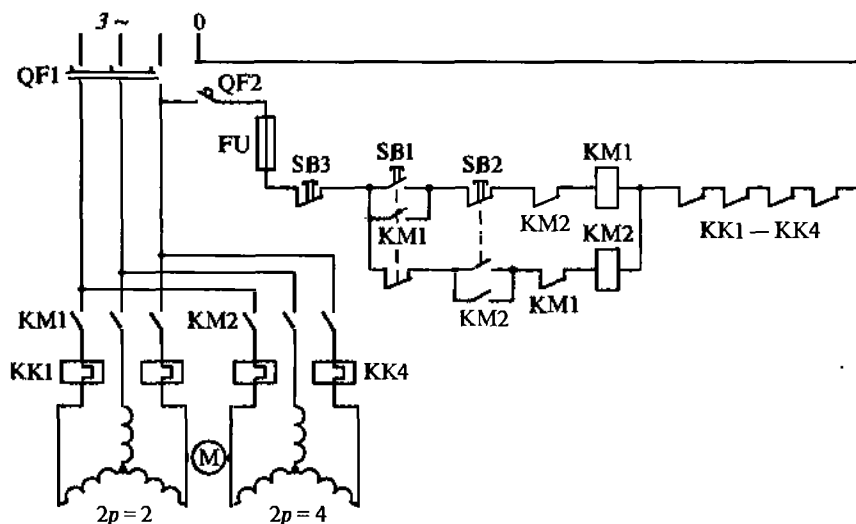


Рис. 8.5. Схема нереверсивного управления двухскоростным асинхронным двигателем

сов ($2p = 2$). Одновременно шунтируется кнопка SB1. Двигатель работает с наибольшей частотой вращения.

При необходимости перевода двигателя на меньшую частоту вращения нажимают сдвоенную кнопку SB2. При этом отключается контактор KM1 и включается контактор KM2. В результате размыкаются линейные контакты KM1 и замыкаются линейные контакты KM2, включающие в сеть обмотку статора с большим числом полюсов ($2p = 4$). Для отключения двигателя следует нажать кнопку SB3. При этом размыкается цепь управления и все устройства в этой цепи отключаются. В итоге размыкаются линейные контакты KM2 и двигатель оказывается выключенным.

Для защиты асинхронного двигателя от перегрузки в линейные провода цепей статоров включены тепловые реле KK1—KK4, а их размыкающие контакты включены последовательно в цепь управления. При перегрузке по току хотя бы в одном линейном проводе сработает тепловое реле, вклю-

ченное в цепь этого провода, и цепь управления окажется разомкнутой.

8.1.6. Схема нереверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором

Схема обеспечивает реостатный пуск двигателя в функции времени с применением реле времени постоянного тока KT1, KT2 и KT3 с замедлением при отпуске (рис. 8.6).

При включении автоматических выключателей QF1 и QF2 срабатывают все реле времени KT1, KT2 и KT3 и их контакты размыкают цепи катушек контакторов KM2, KM3 и KM4, предназначенных для замыкания секций пускового реостата ПР. Пуск двигателя начинается с нажатия кнопки SB1 «Пуск», которая замыкает цепь катушки линейного контактора KM1. При его срабатывании замыкаются линейные контакты KM1, включающие обмотку статора двигателя в трехфазную сеть. Одновременно контакты

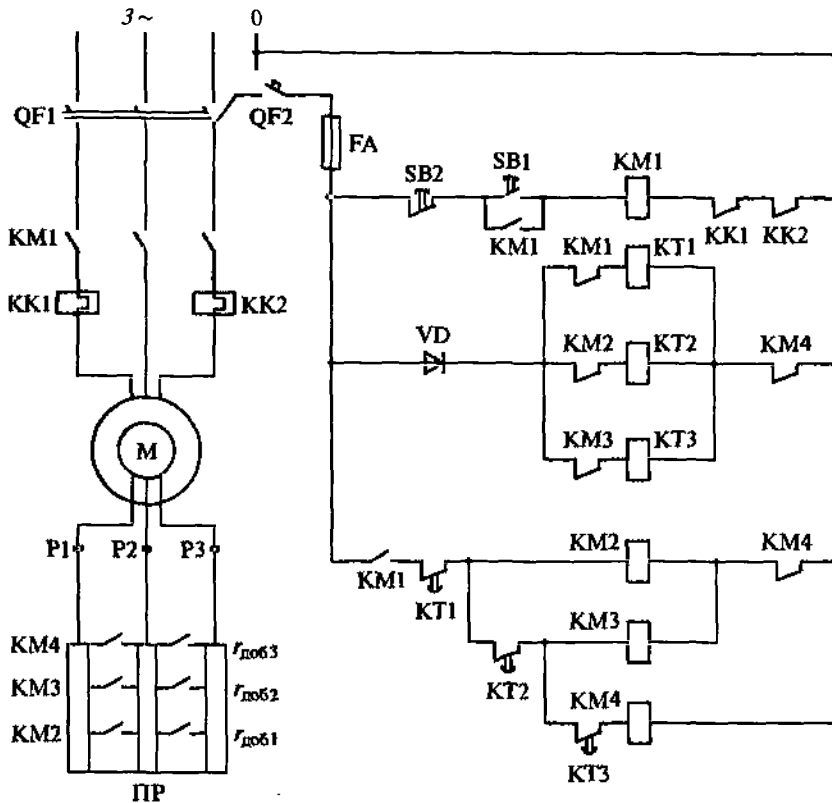


Рис. 8.6. Схема неперевсннвоу управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором

KM1 шунтируют кнопку SB1 так, чтобы при отпуске кнопки цепь катушки KM1 осталась замкнутой. Все контакты в ПР остаются разомкнутыми, т.е. пуск двигателя начинается при полностью введенных ступенях ПР ($r_{доб1} + r_{доб2} + r_{доб3}$). Одновременно контакты линейного контактора KM1 подключают катушки контакторов KM2, KM3 и KM4, а контакты KM1 в цепи реле времени KT1 размыкаются и отключают это реле. Через установленную в этом реле выдержку времени при отпуске контакты KT1 замкнутся, контактор KM2 сработает и своими контактами шунтирует первую ступень ПР так, что пуск дви-

гателя будет продолжаться на второй ступени ПР ($r_{доб2} + r_{доб3}$). Одновременно при срабатывании KM2 его контакты отключают реле времени KT2 и контакты этого реле в цепи контактора KM3 с установленной выдержкой времени включают этот контактор. Kontakтами KM3 будет шунтирована вторая ступень ПР, и пуск двигателя будет продолжаться на третьей ступени ПР ($r_{доб3}$). Одновременно контакты KM3 в цепи реле времени KT3 разомкнут эту цепь и реле будет отключено. Его контакты KT3, спустя время выдержки при отпуске, замкнут цепь катушки контактора KM4, который сработает и своими контактами

зашунтирует последнюю ступень ПР. На этом процесс пуска двигателя заканчивается и наступает режим работы при $r_{\text{доб}} = 0$. Так как работа двигателя может продолжаться длительное время, все реле времени КТ1, КТ2, КТ3 и контакторы КМ2 и КМ3 отключаются посредством размыкающих контактов КМ4. Контакты КМ4 полностью шунтируют ПР.

Остановка двигателя осуществляется нажатием кнопки SB2. При этом размыкается цепь катушки линейного контактора КМ1, контакты которого отключают от сети обмотку статора и катушки контакторов КМ2—КМ4. Что же касается реле времени КТ1—КТ3, то, благодаря замкнутому состоянию контактов в цепи катушек этих реле, они окажутся включенными, что подготовит схему управления к следующему пуску двигателя.

Для защиты двигателя от перегрузки в два линейных провода включены тепловые реле КК1 и КК2, размыкающие контакты которых включены последовательно в цепь катушки линейного контактора КМ1.

8.2. Электронные устройства для управления трехфазными асинхронными двигателями

Применение электронных устройств для управления асинхронными двигателями является в настоящее время наиболее прогрессивным, так как позволяет эффективно использовать в электроприводе простые по устройству и самые надежные в эксплуатации асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. При этом успешно преодолеваются существенные недостатки этих двигателей: неудовлетворительные пусковые и регу-

лировочные свойства. Электронные устройства для управления асинхронными двигателями обычно выполняются на управляемых диодах — тиристорах, а поэтому эти устройства часто называют *тиристорными*.

Если электропривод нерегулируемый, то задача сводится лишь к улучшению пусковых свойств трехфазных асинхронных двигателей (см. 4.7). В этом случае применяют тиристорные устройства плавного пуска. Если же электропривод регулируемый, то применяют тиристорные преобразователи частоты ПЧ, позволяющие использовать в двигателе частотный метод регулирования (см. 4.10). Эти же устройства применяют и для плавного пуска асинхронных двигателей.

8.2.1. Тиристорные устройства плавного пуска трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Устройства плавного пуска двигателей серии ДМС (Софт-стартеры) позволяют:

- запустить и остановить двигатель, исключая механические удары на собственном двигателе и на приводимый механизм;

- снизить пусковые токи в двигателях, а следовательно, устранить возникновение в питающей сети ударных токов, что могло бы нарушить работу других потребителей, включенных в эту сеть;

- уменьшить тепловые воздействия на двигатель, а следовательно, повысить надежность его эксплуатации;

- плавно остановить двигатель, что имеет большое значение для работы электроприводов гидронасосов, а также позволяет избежать резких скачков

давления жидкости в трубах и не нарушить работу обратного клапана;

- получить энергосберегающий эффект как в процессе пуска двигателя, так и в процессе его работы; последнее объясняется тем, что в часы работы двигателя с недогрузкой рассматриваемые устройства позволяют уменьшить напряжение питания двигателя, что поддержит коэффициент мощности двигателя на достаточном уровне и снизит потери (см. 21.6).

Тиристорные устройства плавного пуска обладают *защитными свойствами* от: перегрузки и коротких замыканий; обрыва и «перекоса» фаз резких колебаний напряжения в сети; нарушения порядка следования фаз; затянувшегося процесса пуска.

Все требуемые уставки для конкретных случаев пуска и остановки вводятся в софт-стартер с клавиатуры и визуально отображаются на 32-символьном жидкокристаллическом дисплее. Состояние работы и возможные неисправности фиксируются на четырех светодиодных индикаторах.

Софт-стартеры предназначены для плавного пуска асинхронных двигателей мощностью от 7,5 до 400 кВт при напряжении 380 В. Технические данные софт-стартеров приведены в табл. 8.1.

Степень защиты оболочки софт-стартера IP00, температура окружающей среды от 0 до +50 °С. Допустимое число пусков (стартов) в один час при нагрузке на валу от максимальной до минимальной — от 4 до 60 соответственно. Один софт-стартер способен работать с двумя или большим количеством двигателей, если общий ток не превышает номинальный ток стартера, при этом каждый из этих двигателей должен иметь свою защиту от перегрузки и коротких замыканий.

Таблица 8.1. Технические данные софт-стартеров серии ДМС

Типоразмер	Мощность двигателя, кВт	Номинальный ток, А
ДМС-010Н	7,5	15
ДМС-015Н	11,0	22
ДМС-020Н	15,0	30
ДМС-030Н	22,0	43
ДМС-040Н	30,0	57
ДМС-050Н	37,0	72
ДМС-060Н	45,0	85
ДМС-075Н	55,0	104
ДМС-100Н	75,0	142
ДМС-125Н	93,0	190
ДМС-150Н	110,0	204
ДМС-200Н	150,0	270
ДМС-250Н	185,0	340
ДМС-300Н	225,0	420
ДМС-350Н	250,0	460
ДМС-400Н	315,0	580
ДМС-550Н	400,0	710

Пусковое тиристорное устройство ПТУ-75-6к-50 предназначено для плавного пуска и останова асинхронных двигателей мощностью до 630 кВт и напряжением 6 кВ. Климатическое исполнение УХЛ, категория размещения 3, температура окружающей среды от -10 до +40 °С, степень защиты оболочки IP20, окружающая среда невзрывоопасная, не содержащая токопроводящей пыли и агрессивных паров или газов, разрушающих металлы и изоляцию. Ниже приведены основные технические данные пускового устройства ПТУ-75-6к-50:

Напряжение питающей сети 6 кВ при 50 Гц
Номинальный ток (фазный) 75 А

Диапазон мощностей подключаемых двигателей 250—630 кВт
 Пределы регулирования пускового тока подключаемого двигателя от $I_{\text{ном}}$ до 4 $I_{\text{ном}}$
 Продолжительность пуска (останова) до 30 с
 Количество пусков не более 5 в 1 ч
 Габаритные размеры: шкафа
 управления 600 × 600 × 1600 мм
 силового блока 1200 × 600 × 2200 мм
 Охлаждение воздушное
 естественное

ПТУ обеспечивает плавный пуск двигателя при ограничении пускового тока и его плавный останов без принудительного торможения. По окончании пуска устройство должно шунтироваться рубильником. Включе-

ние и отключение асинхронного двигателя осуществляется с пульта управления устройства непосредственно или дистанционно, что позволяет использовать ПТУ в составе системы автоматического управления.

Аварийная защита ПТУ срабатывает:

- при коротком замыкании в обмотках двигателя и подключающих цепях;
- при обрыве хотя бы одной из фаз на выходе регулятора напряжения;
- при снижении питающего напряжения на величину более допускаемую;
- при превышении тока в цепи двигателя до значения, превышающего допускаемое.

ПТУ снабжен световой сигнализацией о текущем состоянии работы («готов», «включен», «авария»).

Таблица 8.2. Основные технические данные устройства плавного пуска серии УПР1

Тип устройства	Ток, А	Расчетная мощность двигателя, кВт	Реверс	Динамическое торможение
УПР1-2000	25	1,0—10	Нет	Нет
УПР1-2010			Нет	Есть
УПР1-2110			Есть	Есть
УПР1-2120*			Есть	Нет
УПР1-3000	63	10—30	Нет	Нет
УПР1-3010			Нет	Есть
УПР1-3110			Есть	Есть
УПР1-3120*			Есть	Нет
УПР1-4000	160	30—80	Нет	Нет
УПР1-4010			Нет	Есть
УПР1-4120*			Есть	Нет
УПР1-5000	400	80—200	Нет	Нет
УПР1-5010			Нет	Есть
УПР1-5120*			Есть	Нет

* Имеется возможность торможения противовключением для устройств с обратной связью по скорости.

По желанию заказчика возможно изготовление ПТУ на напряжение 10 кВ.

Тиристорные устройства плавного пуска серии УПР1 позволяют значительно повысить ресурс двигателей и механической части рабочих машин, снизить эксплуатационные затраты в системах управления технологическим оборудованием. Устройства серии УПР1 обеспечивают: плавный пуск, реверс и останов двигателя с регулируемым темпом; ограничение тока в переходных процессах электропривода; устранение «рывков» в механической системе электропривода и рабочих машин; полную защиту двигателя при перегрузках, коротких замыканиях, перекосе фаз и т. п.

Основные свойства:

- напряжение питания $U_{\text{ном}} = 380$ В при частоте 50 Гц;
- диапазон регулирования напряжения на выходе от $0,1 U_{\text{ном}}$ до $U_{\text{ном}}$;
- диапазон регулирования длительности пуска от 0,5 до 20 с;
- диапазон регулирования длительности затянутого останова от 1 до 10 с;
- диапазон регулирования времени динамического торможения от 0,5 до 5,0 с;
- КПД не ниже 95 % (табл. 8.2).

Режимы работы: продолжительный S1 и повторно-кратковременный S3 с ПВ = 15, 25, 40, 60 %.

Изготовление по степени защиты IP00, допустимая температура окружающего воздуха от +5 до +45 °С.

Структура обозначения типоразмеров тиристорного устройства серии УПР1:

<u>УПР1</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>
1	2	3	4

1 — УПР — устройства пускорегулирующие, разработка № 1;

2 — номинальный ток: цифра 2 — 25 А; 3 — 63 А; 4 — 160 А; 5 — 400 А;

3 — наличие реверса: 0 — без реверса; 1 — с реверсом;

4 — наличие электрического торможения: 0 — без электрического торможения (только для типоразмеров без реверса).

8.2.2. Преобразователи частоты для управления асинхронными двигателями

Применение тиристорных преобразователей частоты ПЧ повышает управляемость и надежность электропривода, делает его более компактным и удобным в эксплуатации, способствует энергосбережению.

Применяемые в настоящее время ПЧ, укомплектованные промежуточным звеном постоянного тока, достаточно совершенны и обеспечивают реализацию в электроприводе всех режимов работы и торможения электродвигателя (см. 4.11).

Преобразователи частоты обычно дополнены функцией *энергосбережения*. Работая в режиме энергосбережения, такой преобразователь частоты отслеживает силу потребляемого двигателем тока, и если нагрузка электропривода уменьшается, то напряжение на входе двигателя понижается до минимально допустимого, что способствует снижению потерь и повышению КПД и коэффициента мощности двигателя. Эта функция энергосбережения наиболее эффективна в электроприводах, работающих с переменной нагрузкой. Экономия электроэнергии в этом случае может достигать 50 %.

Преобразователи частоты обеспечивают двигателю «мягкий» пуск с заданными значениями пусковых токов.

Таблица 8.3. Технические данные преобразователей частоты серии Р

Параметр	Типоразмер				
	P10	P15	P22	P30	P55
Регулируемая мощность, кВт	5,5; 7,5; 11	15	22	30	55
Номинальный ток нагрузки, А	20	30	45	60	110
Пределы регулирования по частоте, Гц	20—60	20—60	20—60	20—60	20—60
Номинальное напряжение на выходе, В	380	380	380	380	380
Пределы регулирования напряжения, В	10—380	10—380	10—380	10—380	10—380
КПД в номинальном режиме	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Габаритные размеры, мм	500×400×230	500×400×230	605×405×240	605×405×240	820×470×270
Масса, кг	18	20	30	32	48

Таблица 8.4. Основные технические данные преобразователей частоты серии ПЧ—ТППТ

Типоразмер	Ток на выходе (фазный), А	Номинальная мощность двигателя, кВт	Габаритные размеры шкафа, мм	Масса, кг
16-380-50-1	16	5,5	375×240×595	30
20-380-50-1	20	7,5	«	31
25-380-50-1	25	11	«	32
32-380-50-1	32	15	530×400×1235	34
50-380-50-1	50	22	«	34
80-380-50-1	80	37	800×600×1300	68
125-380-50-1	125	55	«	69
160-380-50-1	160	75	«	71
200-380-50-1	200	90	«	72
250-380-50-1	250	110	600×800×2300	180
320-380-50-1	320	160	«	190
400-380-50-1	400	200	«	205
500-380-50-1	500	250	«	245
630-380-50-1	630	315	«	260

Таблица 8.5. Технические характеристики преобразователей частоты фирмы НТАСН

Типоразмер	Мощность двигателя, кВт	Номинальный ток на выходе, А	Частота тока на выходе, Гц	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
L100-004HFE	0,4	1,5	1—360	130×114×129	1,2
L100-007HFE	0,75	2,5	1—360	130×114×156	1,6
L100-015HFE	1,5	3,8	1—360	130×114×156	2,3
L100-022HFE	2,2	5,5	1—360	180×140×164	2,8
L100-030HFE	3,0	7,8	1—360	180×140×164	3,1
L100-040HFE	4,0	8,6	1—360	180×140×164	3,1
L100-055HFE	5,5	13,0	1—360	257×182×170	4,2
L100-075HFE	7,5	16,0	1—360	257×182×170	4,2
J100-015HFE	1,5	3,8	0—400	220×170×146	3,1
J100-022HFE	2,2	5,3	0—400	220×170×146	3,1
J100-037HFE	3,7	8,6	0—400	220×170×146	3,2
J300-055HFE	5,5	13,0	0—400	340×220×195	7,5
J300-075HFE	7,5	16,0	0—400	340×220×195	7,5
J300-110HFE	11,0	23,0	0—400	440×243×220	13,0
J300-150HFE	15,0	32,0	0—400	440×243×220	13,0
J300-220HFE	22,0	48,0	0—400	435×300×250	21,0
J300-300HFE	30,0	58,0	0—400	620×390×330	36,0
J300-370HFE	37,0	75,0	0—400	620×390×330	36,0
J300-450HFE	45,0	90,0	0—400	700×480×330	46,0
J300-550HFE	55,0	110,0	0—400	700×480×330	46,0
J300-750HFE	75,0	149,0	0—400	700×550×270	70,0
J300-900HFE	90,0	176,0	0—400	700×550×270	70,0
J300-1100HFE	110,0	217,0	0—400	780×550×270	80,0
JE300-1300HFE	132,0	250,0	0—300	1100×450×445	95,0
JE300-1600HFE	160,0	308,0	0—300	1250×700×425	190,0
JE300-2000HFE	200,0	383,0	0—300	1250×700×425	190,0
JE300-2500HFE	250,0	483,0	0—300	1250×700×425	190,0
JE300-3150HFE	315,0	621,0	0—300	1450×700×425	500,0
JE300-4000HFE	400,0	771,0	0—300	1450×700×425	500,0
JE300-5000HFE	500,0	958,0	0—300	1450×700×425	500,0

Преобразователи частоты серии Р имеют диапазон изменения частоты от 2 до 50 Гц и напряжения от 10 до 380 В. Эти преобразователи выполняют функции: регулирование частоты вращения двигателей, стабилизацию частоты вращения (при переменной нагрузке), управление пуском и остановом двигателя и его защиту (табл. 8.3).

Преобразователи частоты серии ПЧ-ТНПТ обеспечивают:

- автоматическое управление электроприводом с поддержанием заданного значения частоты вращения двигателя либо технологического параметра рабочего механизма, например, давления рабочего вещества в трубопроводе;

- включение и отключение как местное (с пульта управления), так и дистанционное;

- возможность самозапуска при восстановлении питания, а также автоматическое подключение резервного электропривода (например, насоса) при аварийном отключении основного;

- «мягкий» пуск и останов двигателя;

- защиту: от токов короткого замыкания, при обрыве фазы или «перекосе» фаз, при недопустимом снижении или превышении напряжения питающей сети, перегреве двигателя или преобразователя;

- сигнализацию и индикацию о наличии напряжения в сети, аварийном отключении электропривода, готовности преобразователя к работе, состо-

янии основных коммутирующих устройств электропривода.

Конструктивное исполнение преобразователей — шкаф одностороннего обслуживания. Охлаждение воздушное принудительное. Исполнение по степени защиты IP21. Диапазон мощности управляемых трехфазных асинхронных двигателей от 5,5 до 315 кВт при напряжении 380 В и частоте 50 Гц (табл. 8.4); диапазон изменения напряжения на выходе преобразователя от 0 до 380 В при изменении частоты тока от 0,1 до 50 Гц; форма графика тока на выходе синусоидальная с искажением не более 4—6 %; режим работы продолжительный с наличием реверсов.

Условия эксплуатации: температура окружающей среды от +1 до +40 °С, климатическое исполнение УХЛ, категория размещения 4.

Преобразователи частоты фирмы НІТАСНІ. Преобразователи изготавливаются нескольких серий (табл. 8.5). Преобразователи фирмы НІТАСНІ поставляются заказчикам в комплекте с асинхронными двигателями Владимирского электромоторного завода (ВЭМЗ).

Питание преобразователя возможно от сети трехфазного тока напряжением 380 В частотой 50 Гц. Некоторые типоразмеры (при мощности двигателя не более 7,5 кВт) могут работать от однофазной сети напряжением 220 В. По сравнению с преобразователями других типов, преобразователи НІТАСНІ отличаются компактностью.

РАЗДЕЛ III

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ГЛАВА 9

СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

9.1. Принцип действия синхронного генератора

Отличительным признаком синхронной машины является жесткая связь между частотой f_1 переменной ЭДС, наведенной во вращающейся обмотке статора, и частотой вращения ротора n_1 , называемой синхронной частотой вращения:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}, \quad (9.1)$$

где p — число пар полюсов в обмотке статора или во вращающемся роторе.

Синхронные машины эксплуатируются как в генераторном, так и в двигательном режимах. Синхронные генераторы составляют основу электроэнергетики, так как практически вся электроэнергия во всем мире вырабатывается посредством синхронных генераторов — турбо- или гидрогенераторами. При этом единичная мощность таких генераторов составляет тысячи и даже миллионы киловатт.

Синхронные двигатели — это обычно двигатели большой мощности, так как именно они по своим технико-экономическим показателям превосходят двигатели других типов. Это

объясняется их способностью работать с коэффициентом мощности, близким к единице. Исключение составляют синхронные двигатели малой мощности (обычно до 1 кВт), в которых используется их способность работать с неизменной синхронной частотой вращения.

Синхронные машины получили применение также в качестве синхронных компенсаторов — генераторов реактивной мощности, позволяющих повышать коэффициент мощности крупных потребителей электроэнергии до весьма высоких значений и способствовать этим энергосбережению.

На рис. 9.1 представлена функциональная схема синхронного генератора. На статоре 1 расположена трехфазная обмотка, в принципе не отличающаяся от аналогичной обмотки асинхронной машины (см. 3.2). На роторе расположен электромагнит с обмоткой возбуждения 2, получающей питание постоянным током через скользящие контакты, осуществляемые посредством двух контактных колец, расположенных на вращающемся роторе, и двух неподвижных щеток.

Приводным двигателем ПД, в качестве которых используются турби-

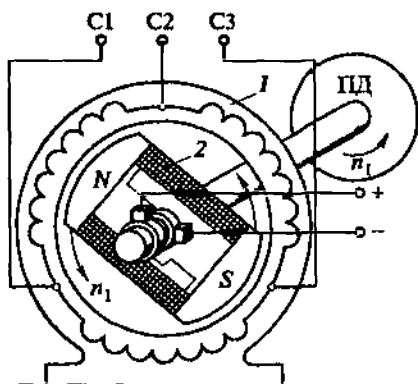


Рис. 9.1. Функциональная схема синхронного генератора

на, двигатель внутреннего сгорания либо другой источник механической энергии, ротор генератора приводится во вращение с синхронной скоростью. При этом магнитное поле электромагнита ротора также вращается с синхронной скоростью и индуцирует в трехфазной обмотке статора переменные ЭДС E_A , E_B и E_C , которые будучи одинаковыми по значению и сдвинутыми по фазе относительно друг друга на $1/3$ периода (120 эл. град), образуют симметричную трехфазную систему ЭДС.

С подключением нагрузки к зажимам обмотки статора C1, C2 и C3 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 (об/мин). Таким образом, в синхронной машине магнитное поле статора и ротор вращаются синхронно.

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

$$e = B_\delta \cdot 2lw_1 v = 0,105 B_\delta l w_1 D_1 n_1, \quad (9.2)$$

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

Формула ЭДС показывает, что при неизменной частоте вращения ротора n_1 форма графика переменной ЭДС обмотки якоря (статора) определяется исключительно законом распределения магнитной индукции в зазоре между статором и полюсами ротора B_δ . Если бы график магнитной индукции в зазоре представлял собой *синусоиду* ($B_\delta = B_{\max} \sin \alpha$), то ЭДС генератора была бы *синусоидальной*. Однако получить синусоидальное распределение индукции в зазоре практически невозможно. Так, если воздушный зазор δ постоянен (рис. 9.2), то магнитная индукция B_δ в воздушном зазоре распределяется по трапецеидальному закону (график 1), а следовательно, и график ЭДС генератора представляет собой трапецию. Если же края полюсов ротора «скосить» так, чтобы зазор на

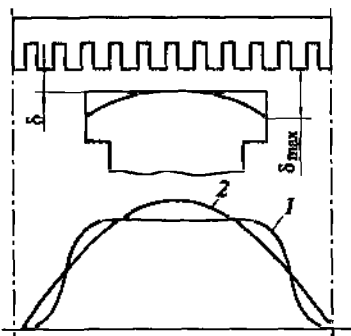


Рис. 9.2. Графики распределения магнитной индукции в воздушном зазоре явнополюсного синхронного генератора

краях полюсных наконечников был равен $\delta_{\max}$ (как это показано на рис. 9.2), то график распределения магнитной индукции в зазоре приблизится к синусоиде (график 2), а следовательно, и график ЭДС, индуцированной в обмотке генератора, приблизится к синусоиде.

Частота ЭДС синхронного генератора f_1 (Гц) пропорциональна *синхронной частоте вращения* ротора n_1 (об/мин)

$$f_1 = \frac{pn_1}{60},$$

где p — число пар полюсов; в рассматриваемом генераторе (см. рис. 9.1) два полюса, т. е. $p = 1$.

Для получения ЭДС промышленной частоты (50 Гц) в таком генераторе ротор необходимо вращать с частотой $n_1 = 3000$ об/мин.

9.2. Способы возбуждения синхронных машин

Основным способом возбуждения синхронных машин является **электромагнитное возбуждение**, состоящее в том, что на полюсах ротора располагают обмотку возбуждения. При прохождении по этой обмотке постоян-

ного тока возникает МДС возбуждения, которая наводит в магнитной системе машины магнитное поле.

До последнего времени для питания обмотки возбуждения применялись преимущественно специальные генераторы постоянного тока независимого возбуждения, называемые возбудителями В (рис. 9.3, а). Обмотка возбуждения (ОВ) получает питание от другого генератора (параллельного возбуждения), называемого подвозбудителем (ПВ). Ротор синхронной машины и якорей 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 получила применение **бесконтактная система электромагнитного возбуждения**, при которой синхронный генератор не имеет контактных колец на роторе. В качестве возбудителя в этом случае при-

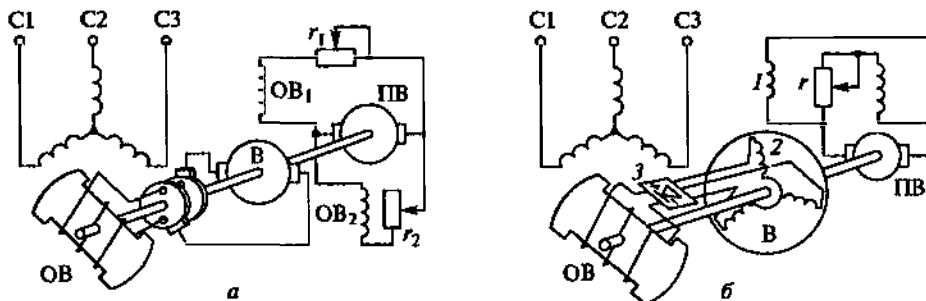


Рис. 9.3. Контактная (а) и бесконтактная (б) системы электромагнитного возбуждения синхронных генераторов

меняют синхронный генератор переменного тока В (рис. 9.3, 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, то на выходе обмотки якоря возбудителя включают полупроводниковый преобразователь 3, расположенный на валу синхронной машины и вращающийся вместе с ее обмоткой возбуждения и якорем возбудителя. Питание постоянным током обмотки возбуждения 1 возбудителя В 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. 9.4, а), когда энергия пере-

менного 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 машины.

На рис. 9.4, б представлена 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 выходе СГ (через трансформатор напряжения ТН) и тока нагрузки СГ (от трансформатора тока ТТ). Схема содержит блок защиты БЗ, обеспечивающий защиту обмотки возбуждения ОВ от перенапряжений и токовой перегрузки.

Мощность, затрачиваемая на возбуждение, обычно составляет от 0,2

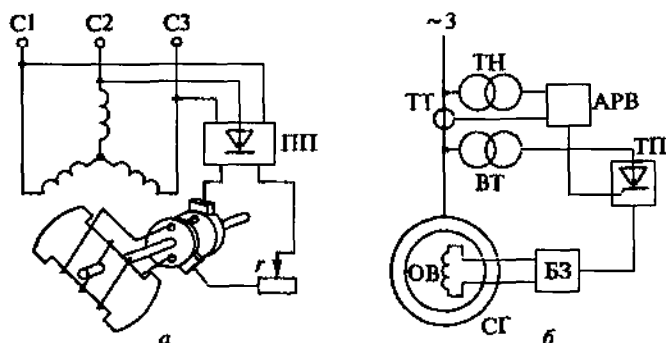


Рис. 9.4. Принцип самовозбуждения синхронных генераторов

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 ограничено машинами мощностью не более нескольких киловатт.

9.3. Типы синхронных машин и их конструктивные особенности

Синхронная машина состоит из неподвижной части — статора и вращающейся части — ротора. Статоры синхронных машин в принципе не отличаются от статоров асинхронных двигателей (см. 3.2), т. е. состоят из корпуса, сердечника и обмотки.

Конструктивное исполнение статора синхронной машины может быть различным в зависимости от назначения и габаритов машины. 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. Для удобства транспортировки и монтажа корпуса статоров крупногабаритных синхронных машин делают разъемны-

ми. Роторы синхронных машин могут иметь две принципиально различающиеся конструкции: явнополюсную и неявнополюсную (рис. 9.5).

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 — дизельные или бензиновые. Применение любого из перечисленных типов приводных 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 об/мин), поэтому для получения переменного тока промышленной частоты (50 Гц) в гидрогенераторе применяют ротор с большим числом полюсов. Роторы гидрогенераторов имеют *явнополюсную* конструкцию, при которой каждый полюс выполняют в виде отдельного узла, состоящего из сердечника 1, полюсного наконечника 2 и полюсной катушки 3 (рис. 9.5, а). Все полюсы ротора закреплены на ободу 4, являющемся также яром магнитной систе-

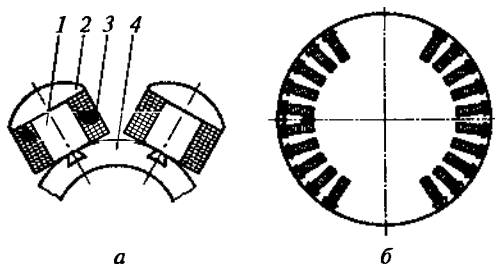


Рис. 9.5. Роторы синхронных машин:
а — явнополюсный; б — неявнополюсный

мы машины, в котором замыкаются потоки полюсов. Гидрогенераторы обычно изготавливают с вертикальным расположением вала. При таком расположении ротора синхронной машины на его подшипники действуют значительные осевые силы, создаваемые массой ротора генератора и колесом гидротурбины. Поэтому неизменным элементом вертикальных гидрогенераторов является *подпятник*.

По своей конструкции вертикальные гидрогенераторы подразделяют на **подвесные** и **зонтичные**. В первом случае (рис. 9.6, а) подпятник 8 расположен в верхней части агрегата, на верхней крестовине 7, и весь агрегат «подвешен» к этой крестовине и к подпятнику (подвесное исполнение). Во втором случае (рис. 9.6, б) подпятник 8 находится на нижней крестовине 12 генератора или на крышке гидротурбины, и генератор в виде «зонта» расположен над подпятником (зонтичное исполнение).

Достоинствами гидрогенераторов подвесного исполнения являются:

- уменьшение потерь на трение в подпятнике благодаря более низкой

окружной скорости на нем (из-за его меньшего диаметра);

- возможность обслуживания подпятника посредством крана машинного зала ГЭС;

- более надежную защиту обмоток от масляных паров, поступающих из масляной ванны подпятника, расположенной выше статора и ротора.

Достоинства зонтичной конструкции — уменьшение высоты генератора и машинного зала, массы генератора и расхода материалов.

Однако гидрогенераторы зонтичного исполнения не могут быть применены при малом диаметре гидротурбины (в шахте оказывается невозможным разместить подпятник).

На рис. 9.7 показана конструкция вертикального гидрогенератора зонтичного типа и обозначены его основные элементы. В верхней части гидрогенератора (на общем валу) обычно располагаются вспомогательные электрические машины: возбудитель 7 (иногда с подвозбудителем) и регуляторный генератор, представляющий собой небольшой синхронный генератор с возбуждением постоянными маг-

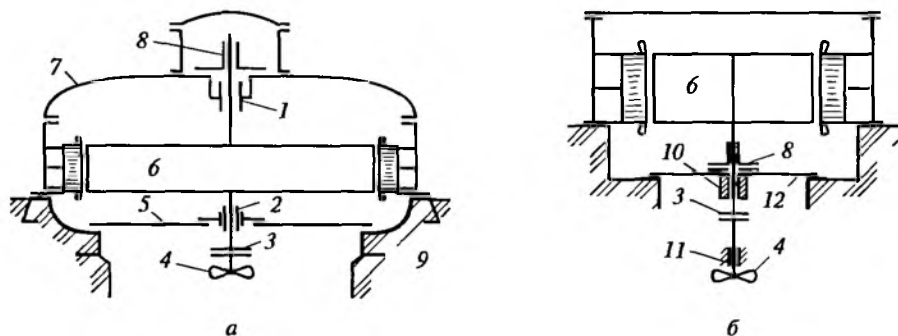


Рис. 9.6. Конструктивные схемы вертикальных гидрогенераторов подвесного (а) и зонтичного (б) исполнений:

1 — верхний направляющий подшипник; 2 — нижний направляющий подшипник; 3 — фланец вала; 4 — гидротурбина; 5 — нижняя крестовина; 6 — ротор; 7 — верхняя крестовина; 8 — подпятник; 9 — фундамент; 10 — направляющий подшипник; 11 — направляющий подшипник турбины; 12 — нижняя крестовина

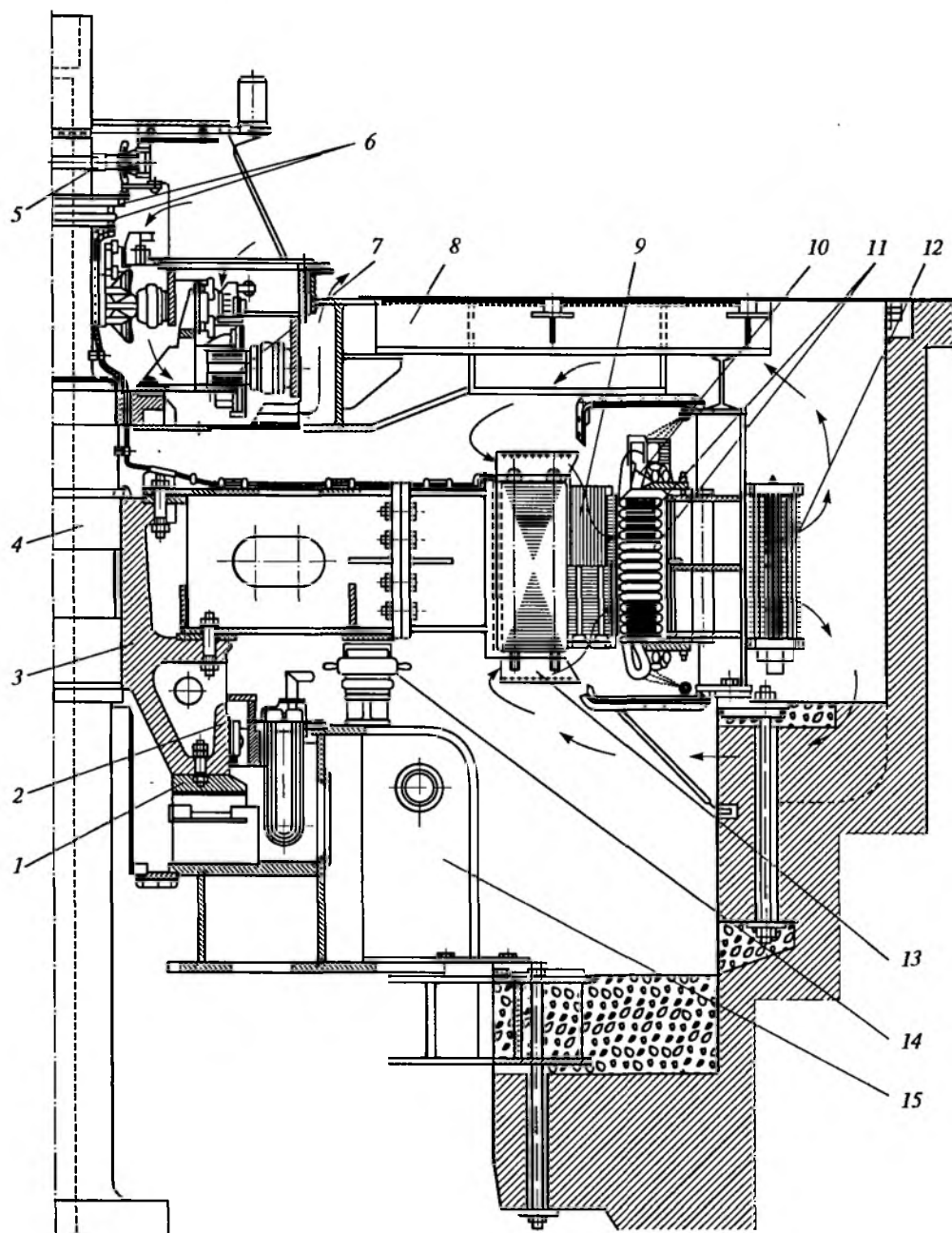


Рис. 9.7. Устройство вертикального синхронного генератора зонтитчного исполнения:
 1 — подпятник; 2 — направляющий подшипник; 3 — втулка ротора; 4 — вал; 5 — вспомогательный генератор; 6 — контактные кольца; 7 — возбудитель; 8 — верхняя крестовина; 9 — обмотка возбуждения; 10 — обмотка статора; 11 — пакеты сердечника статора, разделенные радиальными вентиляционными каналами; 12 — охладитель воздуха; 13 — вентиляционная лопасть; 14 — тормоз-домкрат; 15 — нижняя (несущая) крестовина

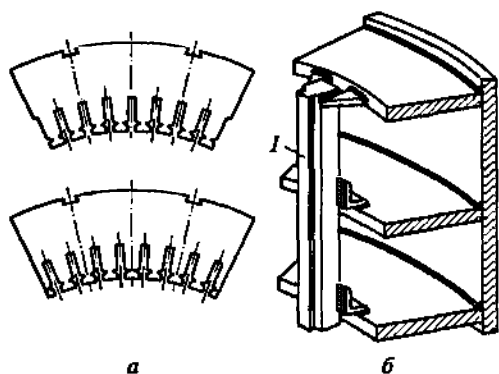


Рис. 9.8. Сегменты сердечника статора (а) и клинья (I) для их крепления (б)

нитями, расположенными на роторе. Напряжение от щеток возбуждателя 7 через контактные кольца 6 проводами, проложенными вдоль вала 4, подается на обмотку возбуждения 9 основного генератора, расположенную на роторе.

Сердечник статора 11 генератора ввиду его значительного диаметра набирается из сегментов (рис. 9.8), с наружной стороны которых имеются

выемки в форме «ласточкиного хвоста». Посредством этих выемок сегменты статора крепятся на клиньях, приваренных к кольцам станины.

Полюсы ротора крепятся на обode посредством Т-образных хвостов и фиксируются в пазах ротора встречными клиньями (рис. 9.9). Необходимость прочного закрепления полюсов ротора вызвано действием на них центробежных сил, возникающих при вращении ротора. Эти силы достигают наибольших значений при аварийных отключениях генератора от сети, когда частота вращения ротора резко возрастает, превышая номинальное значение в 2—2,5 раза («угонная скорость»).

Сила тяжести вращающихся частей гидрогенератора воспринимается подпятником 1, расположенным в нижней части, как это делается в вертикальных генераторах зонтичного исполнения (см. рис. 9.6, б). Это усилие воспринимается нижней грузонесущей крестовиной 12.

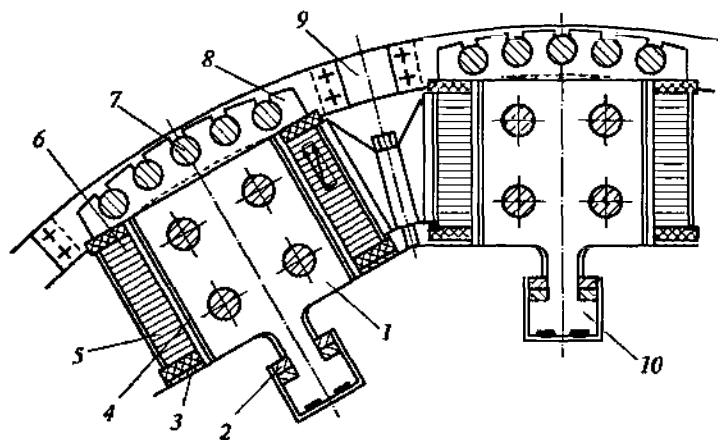


Рис. 9.9. Конструкция полюсов ротора и катушек возбуждения явнополюсного ротора:

1 — сердечник полюса; 2 — встречные клинья хвостового крепления полюса; 3 — изоляционная шайба; 4 — корпусная изоляция полюса; 5 — проводник катушки возбуждения; 6 — витковая изоляция катушки; 7 — стержень успокоительной обмотки; 8 — сегмент успокоительной обмотки; 9 — гибкое соединение сегментов; 10 — хвост сердечника полюса

В рассматриваемом гидрогенераторе применено воздушное охлаждение по принципу самовентилиции по замкнутой системе. С этой целью на сердечнике ротора расположены лопасти 13 вентилятора, которые при вращении ротора создают требуемый аэродинамический напор. Возникшие при этом потоки воздуха омывают сердечники и обмотки ротора и статора. Нагревшийся воздух далее поступает в воздухоохладитель, где, проходя сквозь систему труб, охлаждается до необходимой температуры и вновь поступает для охлаждения ротора и статора. Для охлаждения воздуха до требуемой температуры через трубки воздухоохладителя пропускают проточную воду.

Получили применение гидрогенераторы с горизонтальным расположением вала, заключенные в водоне-

проницаемую оболочку, называемые **капсульными** генераторами (рис. 9.10). Генератор вместе с гидротурбиной размещается непосредственно в водном потоке. Такие генераторы применяют на низконапорных ГЭС. При этом не требуется машинный зал и ГЭС получается более компактной и дешевой по сравнению с ГЭС традиционного устройства. Капсульные гидрогенераторы изготовляют мощностью до нескольких десятков мегаватт.

Паровая турбина работает при большой частоте вращения, поэтому приводимый ею во вращение генератор, называемый **турбогенератором**, является быстроходной синхронной машиной. Роторы такого генератора выполняют либо двухполюсными ($n_1 = 3000$ об/мин), либо четырехполюсными ($n_1 = 1500$ об/мин).

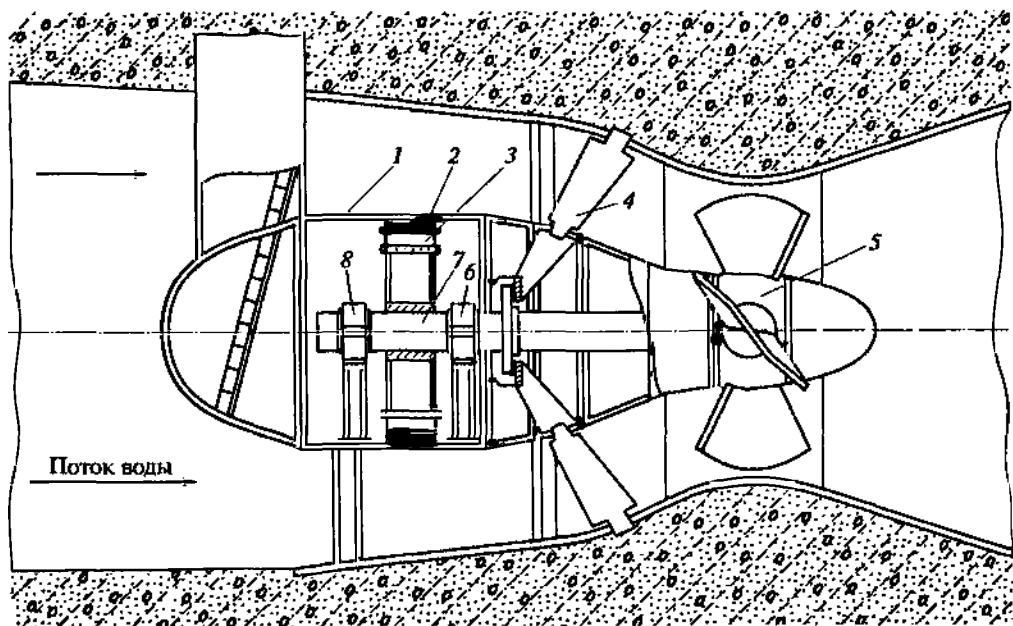


Рис. 9.10. Капсульный (погружной) гидрогенератор:

1 — капсула (оболочка); 2 — статор; 3 — полюс ротора; 4 — устройство, ориентирующее генератор встречно движению потока воды; 5 — гидротурбина; 6 и 8 — подшипники; 7 — вал

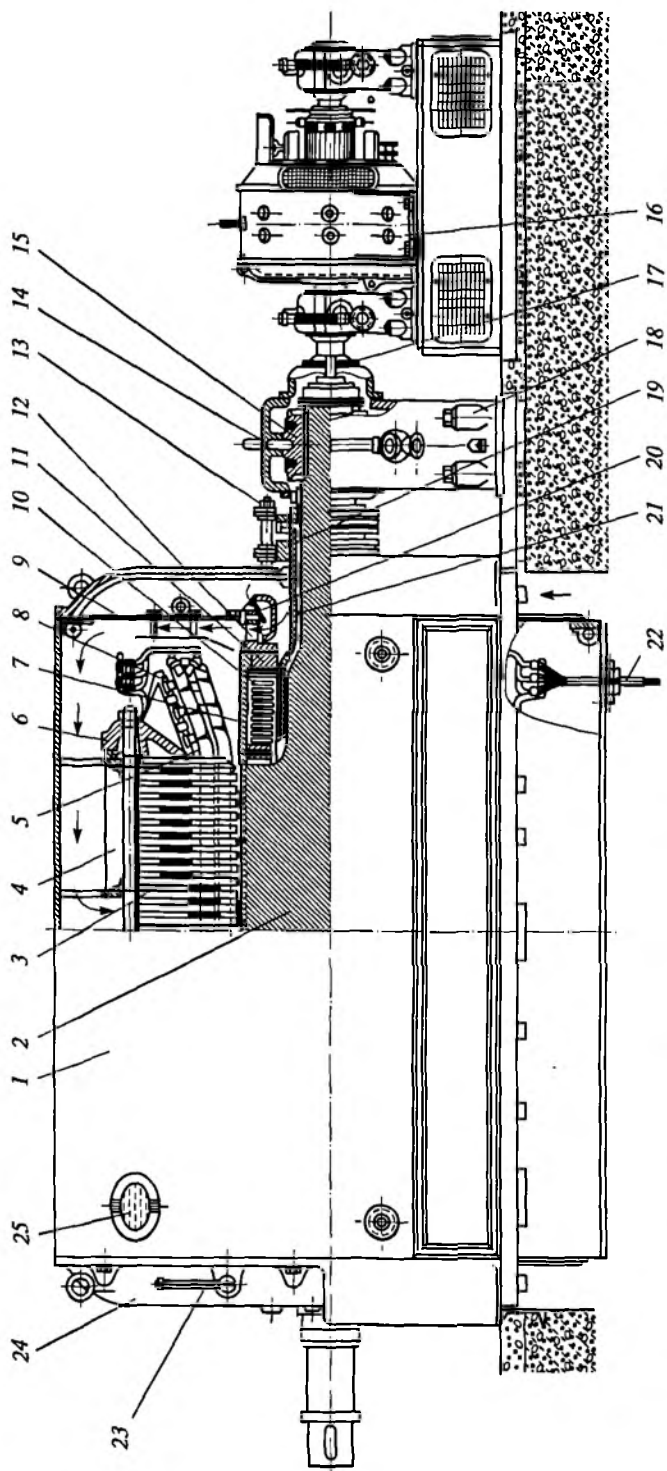


Рис. 9.11. Неявнополюсная синхронная машина (турбогенератор) с косвенным воздушным охлаждением:

1 — корпус статора; 2 — магнитопровод ротора; 3 — пакет магнитопровода статора; 4 — стяжная шпилька; 5 — стержень обмотки статора; 6 — нажимное кольцо; 7 — бандажное кольцо ротора; 8 — кронштейн для крепления лобовых частей обмотки статора; 9 — воздухоподъемная перегородка с диффузором; 10 — катушка обмотки возбуждения; 11 — центрирующее кольцо; 12 — центробежный вентилятор; 13 — траверса со щеточным устройством; 14 — крышка подшипника; 15 — вкладыш подшипника; 16 — электромашинный возбуждатель; 17 — гибкая соединительная муфта; 18 — стоек подшипника; 19 — контактное кольцо; 20 — направляющий узел вентилятора; 21 — соединение между контактными кольцами и обмоткой возбуждения; 22 — выводы обмотки статора; 23 — термометр охлажденного воздуха; 24 — торцевой щит; 25 — смотровой люк

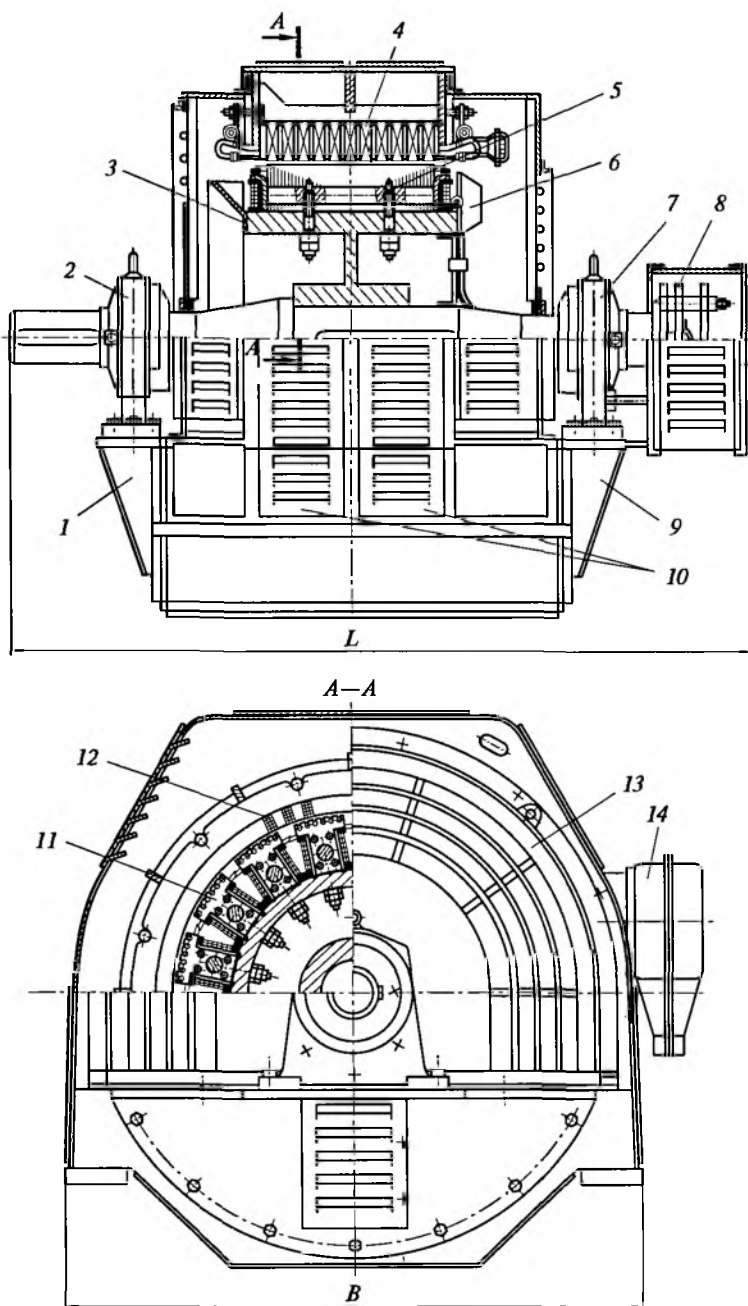


Рис. 9.12. Синхронный генератор автономного питания (дизель-генератор):

1 и 9 — подшипниковые полуштиты; 2 и 7 — стояковые подшипники скольжения; 3 — остов ротора; 4 — пакеты сердечника статора, разделенные радиальными вентиляционными каналами; 5 — шпильки для крепления полюсов ротора; 6 — лопасть вентилятора; 8 — контактные кольца; 10 — жалюзи вентиляционных окон; 11 — полюса ротора; 12 — обмотка статора; 13 — торцевой щит; 14 — коробка выводов

В процессе работы турбогенератора на его ротор действуют значительные центробежные силы. Поэтому по условиям механической прочности в турбогенераторах применяют неявнополюсный ротор, имеющий вид удлиненного стального цилиндра с профрезерованными на поверхности продольными пазами для обмотки возбуждения (см. рис. 9.5, б). Сердечник неявнополюсного ротора изготавливают в виде цельной стальной поковки вместе с хвостовиками (концами вала) или же делают его сборным. Обмотка возбуждения неявнополюсного ротора занимает лишь $2/3$ его поверхности (по периметру). Оставшаяся $1/3$ часть поверхности образует полюсы. Для защиты лобовых частей обмотки ротора от разрушения действием центробежных сил ротор с двух сторон прикрывают стальными бандажными кольцами (каппами), изготавливаемыми обычно из немагнитной стали.

На рис. 9.11 показано устройство турбогенератора с обозначением его основных элементов.

Рассмотренные синхронные генераторы — гидрогенераторы и турбогенераторы — характеризуются значительной мощностью (от 30 до 1200 МВ·А) и высоким напряжением на выходе (до 30 кВ). Эти генераторы применяют на крупных электростанциях, соединенных в единую энергетическую систему России.

Наряду с этим широко используют агрегаты для автономного электроснабжения — небольших населенных пунктов и предприятий, удаленных от промышленных центров, временных промышленных установок и т. п. Эти агрегаты могут быть стационарными и передвижными. Основным видом приводного двигателя в таких агрегатах являются *дизельные двигатели*, а при

небольшой мощности агрегата возможно применение бензиновых двигателей. Диапазон мощности синхронных генераторов для автономного электроснабжения от 5 до 800 кВт при напряжении на выходе обычно 230 и 400 В и лишь при мощности 630 и 800 кВт возможно напряжение на выходе 6300 В. Такие синхронные генераторы имеют явнополюсную конструкцию ротора с горизонтальным расположением вала и рассчитаны на частоты вращения 1500, 1000, 750, 500 и 375 об/мин. На рис. 9.12 показано устройство синхронного генератора для агрегата автономного питания (дизель-генератора) с обозначением его основных элементов.

9.4. Охлаждение крупных синхронных машин

В крупных электрических машинах иногда применяют систему охлаждения (см. 2.3 и 2.4) с использованием водорода в качестве охлаждающего газа. Особые свойства водорода обеспечивают водородному охлаждению ряд преимуществ.

1. Плотность технического водорода более чем в десять раз меньше плотности 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 1000 кВт, а при водородном охлаждении турбогенератора такой же мощности эти потери составляют всего лишь 140 кВт, т. е. более чем в семь раз меньше.

2. Благодаря повышенной теплопроводности водорода, которая в 6—7 раз больше, чем у воздуха, он интенсив-

нее 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, так как 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 сводится к тому, 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 изо-

ляцию (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 проводами обмоток и внутренними слоями магнитопроводов усиливает интенсивность теплоотвода и позволяет существенно повысить удельные электромагнитные нагрузки электрических машин: плотность тока, магнитную индукцию.

9.5. Основные уравнения и характеристики синхронных генераторов

В процессе работы машины в обмотке статора индуцируются ЭДС и протекают токи, создающие магнитодвижущую силу (МДС), максимальное значение которой

$$F_1 = \frac{0,45 m_1 I_1 w_1 k_{o61}}{p}.$$

Эта МДС создает вращающееся магнитное поле, а в воздушном зазоре δ машины создается магнитная индукция, график распределения которой в пределах каждого полюсного деления τ зависит от конструкции ротора (рис. 9.13).

Для синхронных машин справедливы уравнения напряжений:

для явнополюсной машины

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{c1} - I_1 r_1, \quad (9.3)$$

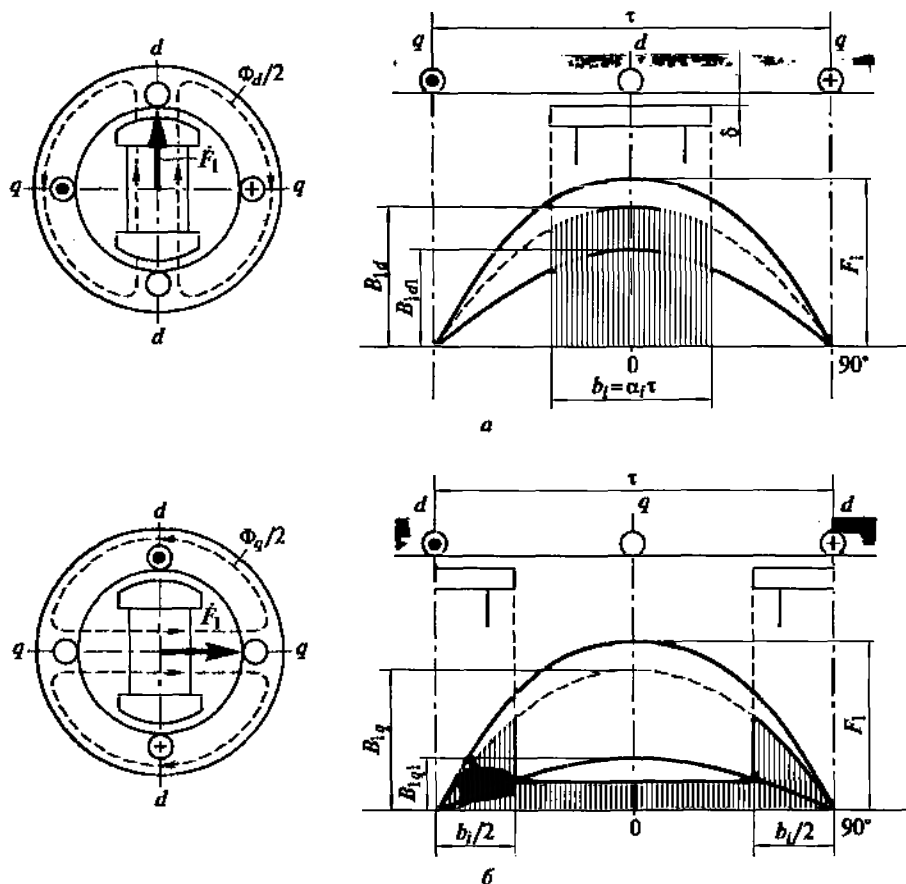


Рис. 9.13. Графики распределения магнитной индукции поля статора по продольной (а) и поперечной (б) осям явнополюсной синхронной машины

где $\dot{E}_0$ — основная ЭДС синхронной машины, пропорциональная основному магнитному потоку Φ_0 ; $\dot{E}_{1d}$ — ЭДС реакции якоря синхронной машины по продольной оси, пропорциональная МДС реакции якоря по продольной оси F_{1d} ; $\dot{E}_{1q}$ — ЭДС реакции якоря по поперечной оси, пропорциональная МДС реакции якоря по поперечной оси F_{1q} ; $\dot{E}_{\sigma 1}$ — ЭДС рассеяния, обусловленная наличием магнитного потока рассеяния Φ_{σ} , величина этой ЭДС пропорциональна индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки статора x_1

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 x_1;$$

$\dot{I}_1 r_1$ — активное падение напряжения в фазной обмотке статора;

для неявнополюсной машины

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_c - \dot{I}_1 r_1. \quad (9.4)$$

Здесь

$$\dot{E}_c = \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1},$$

где $\dot{E}_c$ — синхронная ЭДС неявнополюсной синхронной машины; $\dot{E}_1$ — ЭДС реакции якоря неявнополюсной синхронной машины.

Рассмотренным уравнениям напряжений соответствуют векторные диа-

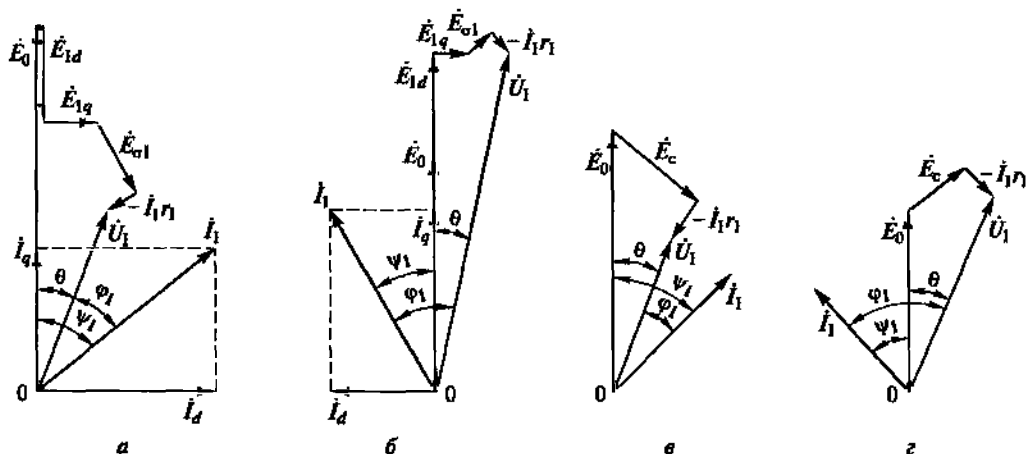


Рис. 9.14. Векторные диаграммы явнополюсного (а, б) и неявнополюсного (в, г) синхронных генераторов при активно-индуктивной (а, в) и активно-емкостной (б, г) видах нагрузки

граммы напряжений (рис. 9.14). Из этих диаграмм видно, что на величину напряжения синхронного генератора влияет не только величина подключенной нагрузки, но и ее характер: при активно индуктивной нагрузке напряжение на выходе синхронного генератора уменьшается (рис. 9.14, а, в), а при активно-емкостной — увеличивается (рис. 9.14, б, г).

Следует иметь в виду, что уравнения напряжений и соответствующие им векторные диаграммы не учитывают магнитного насыщения магнитопровода синхронной машины, которое, как известно, влияет на величину индук-

синхронной машины. При построении практической диаграммы ЭДС намагничивающую силу реакции якоря не разлагают на продольную и поперечную составляющие, поэтому эта диаграмма может быть применена как при расчетах явнополюсных машин, так и при расчетах неявнополюсных машин.

Практическую диаграмму ЭДС синхронного генератора строят на основании характеристик холостого хода $E^* = f(I_B^*)$ и короткого замыкания $I_{IK}^* = f(I_B^*)$. Обычно используют нормальную характеристику холостого хода, построенную в относительных единицах:

$E^* = E_0/U_{\text{НОМ}}$	0,58	1,00	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51
$I_B^* = I_B/I_{B0\text{НОМ}}$	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50

тивных сопротивлений, вызывая их уменьшение. Учет этого насыщения представляет сложную задачу, поэтому при расчетах ЭДС и напряжений синхронных машин обычно пользуются **практической диаграммой ЭДС**, которая учитывает состояние насыщения магнитной системы, вызванное действием реакции якоря при нагрузке

Здесь $I_{B0\text{НОМ}}$ — ток возбуждения в режиме холостого хода, соответствующий ЭДС холостого хода $E_0 = U_{\text{НОМ}}$.

Характеристику трехфазного короткого замыкания $I_{IK}^* = f(I_B^*)$ получают по результатам опыта короткого замыкания, когда частота вращения ротора равна синхронной, а ток в обмотке возбуждения постепенно увеличивают

от нуля до значения, при котором ток короткого замыкания в обмотке статора не достигнет $I_{1к} = 1,25I_{1ном}$. Ток возбуждения $I_{в.к} = I_{в.к.ном}$ соответствует номинальному значению тока статора в режиме короткого замыкания. Отношение тока возбуждения $I_{в0ном}$ к току возбуждения $I_{в.к.ном}$ представляет величину, называемую отношением короткого замыкания ОКЗ, которое является важным параметром, определяющий свойство синхронных машин:

$$ОКЗ = \frac{I_{в0ном}}{I_{в.к.ном}}. \quad (9.5)$$

Для неявнополюсных синхронных машин $ОКЗ = 0,4 - 1,0$; для явнополюсных машин $ОКЗ = 0,8 - 1,8$.

На рис. 9.15 представлена практическая диаграмма ЭДС синхронного генератора, позволяющая определить изменение напряжения на выходе генератора $\Delta U_{ном}$ при сбросе нагрузки от номинальной $I_1 = I_{1ном}$ до нулевой $I_1 = 0$:

$$\Delta U_{ном} = \frac{NP - NR}{NR} = \frac{E_0 - U_{1ном}}{U_{1ном}}. \quad (9.6)$$

Графически выраженная зависимость напряжения на выходе генератора U_1 от тока нагрузки I_1 при неизменном токе возбуждения представлена внешними характеристиками, построенными для разного вида нагрузок (рис. 9.16, а). Величина $\Delta U_{ном}$ не должна превышать 50 %. Напряжение на выходе синхронного генератора при колебаниях нагрузки поддерживается неизменным быстродействующими автоматическими регуляторами тока в обмотке возбуждения, работающими в соответствии с регулировочными характеристиками генератора (рис. 9.16, б). В этом случае ток возбуждения при колебаниях нагрузки генератора от нулевой до номинальной изменяется таким образом, что напряжение на выходе сохраняется равным номинальному значению.

Электромагнитные моменты синхронных машин (Н · м):

явнополюсной

$$M_H = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 X_c} \sin \theta; \quad (9.7)$$

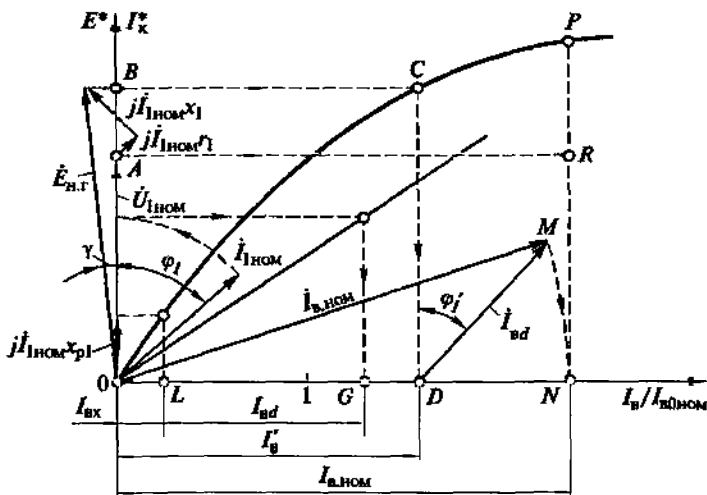


Рис. 9.15. Практическая диаграмма ЭДС синхронного генератора

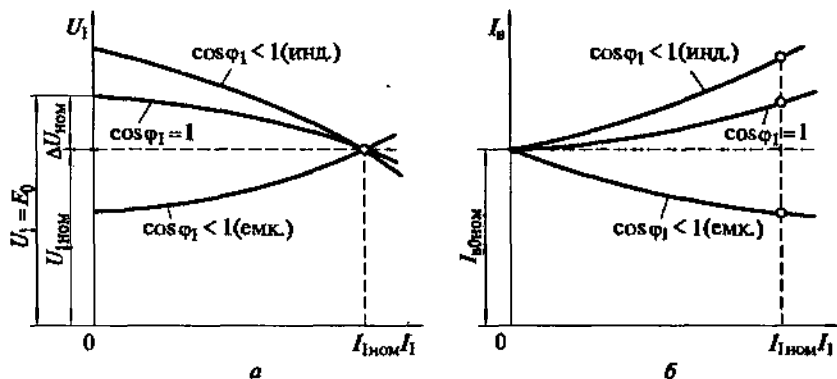


Рис. 9.16. Внешние (а) и регулировочные (б) характеристики синхронного генератора

явнополюсной

$$M_{я} = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (9.8)$$

где x_d и x_q — синхронные индуктивные сопротивления явнополюсной синхронной машины по продольной и поперечной осям соответственно, Ом; θ — угол нагрузки синхронной машины, град.

Первое слагаемое выражения (9.7) представляет собой основную составляющую электромагнитного момента

$$M_{осн} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta, \quad (9.9)$$

которая имеет место в любой синхронной машине независимо от конструкции ротора. Непременным условием возникновения этой составляющей является наличие возбуждения машины, так как она пропорциональна основной ЭДС машины

$$E_0 = 4,44 \Phi f_1 \omega_1 k_{об1}.$$

Другая составляющая представляет собой реактивную составляющую электромагнитного момента

$$M_p = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (9.10)$$

Реактивная составляющая момента имеет место и в невозбужденной машине ($E_0 = 0$), лишь бы к обмотке статора было подведено напряжение U_1 . Но непременным условием возникновения этого момента является явнополюсность ротора, так как только в этом случае синхронные индуктивные сопротивления по поперечной и продольной осям неравны, т. е. $x_q < x_d$. Из этого следует, что в неявнополюсной синхронной машине реактивная составляющая $M_p = 0$ и электромагнитный момент M_n определяется лишь его основной составляющей, т. е. $M_n = M_{осн}$.

На рис. 9.17 графики зависимости электромагнитного момента и его составляющих от нагрузки синхронной машины: 1 — график основной составляющей $M_{осн} = f(\theta)$, он же является графиком момента M_n неявнополюсной синхронной машины; 2 — график реактивной составляющей $M_p = f(\theta)$; 3 — график результирующего момента явнополюсной машины $M_{я} = f(\theta)$.

Угол нагрузки $\theta_{ном}$ соответствует номинальному моменту $M_{ном}$. Максимальный момент синхронной маши-

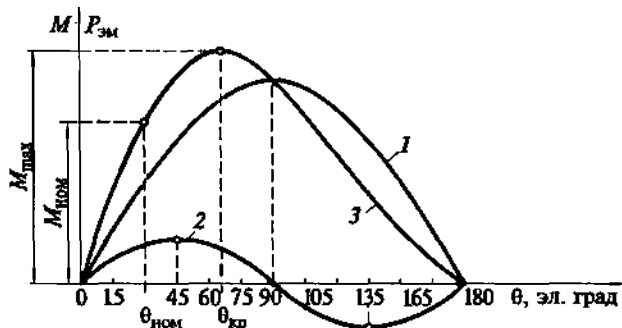


Рис. 9.17. Угловые характеристики синхронного генератора

ны определяет ее перегрузочную способность — понятие важное как для синхронных генераторов, работающих параллельно с сетью, так и для синхронных двигателей. В неявнополюсных синхронных машинах максимальный момент соответствует углу нагрузки $\theta = 90$ эл. град, в явнополюсных машинах максимальный момент соответствует углу нагрузки $\theta_{кр} < 90$ эл. град и обычно составляет 60—80 эл. град в зависимости от соотношения основного и реактивного электромагнитных моментов этой машины. Для расчета критического угла нагрузки явнополюсных синхронных машин можно воспользоваться выражением:

$$\cos \theta_{кр} = \sqrt{\beta^2 + 0,5} - \beta.$$

Здесь

$$\beta = \frac{E_0}{4U_1(x_d/x_q - 1)}.$$

Синхронный генератор, включенный на параллельную работу, обладает *синхронизирующей способностью*. Физический смысл синхронизирующей способности синхронных генераторов состоит в следующем. В процессе работы синхронного генератора в нем действуют два вращающихся магнитных поля: поле статора и поле ротора. Оба поля вращаются синхрон-

но и создают в машине результирующее вращающееся магнитное поле. Так как обмотки статоров всех генераторов, включенных на параллельную работу, электрически связаны между собой, то также «связанными» оказываются и результирующие магнитные поля всех генераторов, вращающихся с синхронной частотой вращения n_1 .

Результирующее магнитное поле машины замыкается через сердечник ротора. Поэтому электрическая связь между обмотками статоров параллельно работающих машин в конечном счете переходит в магнитную связь роторов этих машин, аналогичную эластичной механической связи, которая позволяет роторам смещаться относительно друг друга в пределах угла нагрузки $\theta < \theta_{кр}$. При этом роторы продолжают вращаться с синхронной частотой. Лишь при смещении ротора какой-либо из параллельно работающих машин на угол θ , выходящий за пределы критического значения $\theta_{кр}$, связь ротора этой машины с роторами других машин нарушается и машина выходит из синхронизма.

Для количественной оценки синхронизирующей способности синхронной машины вводят понятия *удельной синхронизирующей мощности* p_c и *удель-*

ного синхронизирующего момента m_c . Удельная синхронизирующая мощность определяется отношением приращения электромагнитной мощности $\Delta P_{эм}$ к соответствующему приращению угла $\Delta\theta$ (рис. 9.18):

$$p_c = \frac{\Delta P_{эм}}{\Delta\theta};$$

удельный синхронизирующий момент

$$m_c = \frac{\Delta M}{\Delta\theta}. \quad (9.11)$$

Величины p_c и m_c тем больше, чем круче подъем угловой характеристики на участке, соответствующем изменению угла нагрузки $\Delta\theta$. В неустойчивой области угловой характеристики при $\theta > \theta_{кр}$ значения p_c и m_c отрицательны, т.е. *устойчивая работа синхронной машины соответствует положительным значениям p_c и m_c .*

При изменениях нагрузки генератора нарушается равенство между мощностью приводного двигателя и мощностью генератора. Возникающий при этом небаланс мощностей $\Delta P_{эм}$ представляет собой синхронизирующую мощность $\Delta P_{эм} = p_c \Delta\theta$. Синхронизирующей мощности соответствует синхронизирующий момент

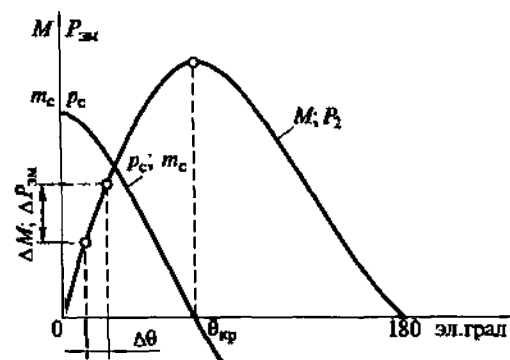


Рис. 9.18. К понятию о синхронизирующей способности синхронной машины

$$\Delta M = \frac{\Delta P_{эм}}{\omega_1} = m_c \Delta\theta. \quad (9.12)$$

Этот момент обусловлен разностью электромагнитного момента генератора и вращающего момента приводного двигателя и оказывает на ротор генератора действие, предотвращающее выход машины из синхронизма.

Наибольшей синхронизирующей способностью синхронная машина обладает при $\theta = 0$. С ростом угла θ синхронизирующая способность машины снижается и при $\theta = \theta_{кр}$ исчезает ($p_c = 0$, $m_c = 0$). Синхронизирующей способностью обладают не только синхронные генераторы, но и синхронные двигатели (см. гл. 11).

При определении параметров синхронных машин пользуются U-образными характеристиками, представляющими собой зависимость тока статора I_1 от тока в обмотке возбуждения I_b при неизменной нагрузке P_2 (рис. 9.19). Из этих характеристик следует, что, изменяя величину тока возбуждения, появляется возможность регулировать коэффициент мощности $\cos\varphi_1$ синхронного генератора, так как измене-

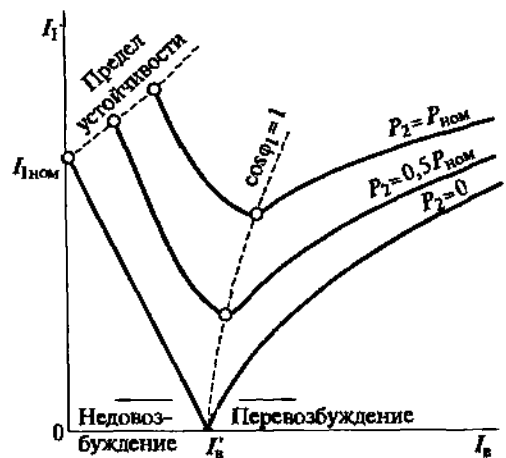


Рис. 9.19. U-образные характеристики синхронного генератора

ния тока возбуждения вызывают изменения тока в цепи статора лишь за счет его реактивной составляющей. Активная составляющая тока статора при этом остается неизменной. Ток возбуждения $I'_в$ соответствует работе генератора с коэффициентом мощности $\cos \varphi_1 = 1$. Создавая режим *перевозбуждения* $I'_в > I'_в$, вызывают опережение по фазе тока сети $\dot{I}_с$ относительно напряжения $\dot{U}_1$, что способствует повышению коэффициента мощности в сети. Необходимо иметь в виду, что при чрезмерном уменьшении тока воз-

буждения может наступить такое размагничивание генератора, при котором он выпадает из синхронизма, т. е. нарушится магнитная связь между намагниченными полюсами ротора и вращающимся полем статора. Это минимальное значение тока возбуждения, соответствующее конкретному значению активной нагрузки генератора, определяет *предел устойчивости* синхронного генератора. С ростом нагрузки генератора это предельное значение тока возбуждения увеличивает-ся (см. рис. 9.19).

ГЛАВА 10

СЕРИИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

10.1. Синхронные явнополюсные генераторы серий СГД2, СГД2М

Синхронные явнополюсные генераторы серий СГД2 и СГД2М со статической системой возбуждения предназначены для комплектации дизельных и газо-поршневых электрических агрегатов, используемых на стационарных электростанциях в качестве основных, резервных и аварийных источников электроэнергии трехфазного тока частотой 50 Гц. Генераторы имеют 16 полюсов, синхронная частота вращения 375 об/мин (табл. 10.1). Генераторы поставляются комплектно с возбудительным устройством КУВМ. Виды климатического исполнения: УХЛ4, О4. Конструктивное исполнение по способу монтажа IM 7115. Степень защиты: генераторов — IP11, коробок выводов — IP21, возбудительных устройств — IP00 (со стороны обслуживания — IP20). Способы охлаж-

дения: генераторов — ICA01, возбудительных устройств и щитов — естественный воздушный. В генераторах используются подшипники скольжения с принудительной системой смазки, объединенной с системой смазки приводного двигателя.

Структура обозначения синхронных генераторов серий СГД2 и СГД2М:

СГД	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х
1	2	3	4	5	6	7	8

1 — СГД — синхронные генераторы дизельные;

2 — номер серии 2;

3 — исполнение модернизированное М;

4 — условное обозначение габарита 17;

5 — длина сердечника статора (см): 36, 44, 50;

6 — число явно выраженных полюсов 16;

7 — УВ усиленное исполнение фланца;

8 — климатическое исполнение и место расположения при эксплуатации.

В генераторах применено возбудительное устройство типа КУВМ, ко-

Таблица 10.1. Технические данные синхронных генераторов серий СГД2 и СГД2М 17-го габарита

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А	U_b , В	I_b , А	ОКЗ	$\eta_{ном}$, %	J , кг·м ²
СГД2-17-36-16УХЛ4 СГД2-17-36-16УВ-УХЛ4	630	400	1140	47	205	0,84	93,8	424
СГД2-17-44-16УХЛ4	800	400	1443	57	235	0,88	94,1	512
СГД2-17-44-16-О4 СГД 2-17-44-16УВ-О4	630	400	1140	50	186	1,14	94,4	512
СГД2-17-36-16УХЛ4 СГД2-17-36-16УВ-УХЛ4 СГД2М-17-36-16УХЛ4 СГД2М-17-36-16УВ-УХЛ4	630	6300	72	58	225	0,84	93,7	400
СГД2-17-44-16УХЛ4 СГД2М-17-44-16УХЛ4	800	6300	92	64	245	0,89	93,8	487
СГД2-17-44-16-О4 СГД2-17-44-16УВ-О4 СГД2М-17-44-16-О4 СГД2М-17-44-16УВ-О4	630	6300	72	56	205	1,11	94,0	487
СГД2-17-50-16-О4 СГД2М-17-50-16-О4	800	6300	92	64	219	1,27	94,5	549

торое обеспечивает: начальное возбуждение генератора; стабильность внешних характеристик генератора по реактивному току в пределах от 0 до 3 % при номинальном коэффициенте мощности; измерение электрических и тепловых характеристик генератора; контроль параметров генератора и приводного двигателя и сигнализацию при неисправностях и аварийных ситуациях.

10.2. Синхронные явнополюсные генераторы серий ЕСС и ЕСС5

Синхронные явнополюсные трехфазные генераторы серий ЕСС и ЕСС5 со статической системой возбуждения и автоматическим регулированием напряжения используются в автономных источниках переменного тока. Генера-

торы серии ЕСС выпускаются с номинальное напряжение 230 и 400 В частотой переменного тока 50 Гц при частоте вращения 1000 или 1500 об/мин, а генераторы серии ЕСС5 выпускаются с номинальным напряжением 230, 400 и 440 В при частоте переменного тока 50 Гц на частоту вращения 1000 и 1500 об/мин или при частоте переменного тока 60 Гц на частоту вращения 1200 и 1800 об/мин. Генераторы снабжены аппаратурой для автоматического регулирования напряжения по заданной уставке с точностью $\pm 2\%$ для генераторов ЕСС и $\pm 5\%$ — генераторов ЕСС5 (табл. 10.2).

Синхронные генераторы серий ЕСС и ЕСС5 применяются в передвижных и стационарных агрегатах автономного электропитания и не предназначены для включения на параллельную работу, режим работы продолжительный S1.

Таблица 10.2. Технические характеристики синхронных явнополюсных генераторов серий ECC и ECC5

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$S_{\text{ном}}$, кВ·А	$I_{\text{ном}}$, А*	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	h (габарит), мм	Масса, кг
ECC-52-4	5	6,25	$\frac{15,7}{9,0}$	1500	80,2	180	125
ECC-62-4	12	15,0	$\frac{37,7}{21,7}$	1500	86,0	200	238
ECC-81-4	20	25,0	$\frac{62,8}{36,0}$	1500	87,0	250	349
ECC-82-4	30	31,5	$\frac{94,0}{54,0}$	1500	88,0	250	420
ECC-91-4	50	62,5	$\frac{157,0}{90,3}$	1500	90,0	315	590
ECC5-61-4	8	10,0	$\frac{25,2}{14,5}$	1500	84,7	200	160
ECC5-62-4	12	15,0	$\frac{31,5}{21,7}$	1500	85,0	200	189
ECC5-81-4	20	25,0	$\frac{62,8}{36,0}$	1500	86,0	250	300
ECC5-81-4	20	25,0	$\frac{62,8}{36,0}$	1000	86,0	250	300
ECC5-82-4	30	37,5	$\frac{—}{54,0}$	1800	88,2	250	340
ECC5-82-4	30	37,5	$\frac{94,0}{54,0}$	1500	88,2	250	340
ECC5-83-4	30	37,5	$\frac{94,0}{54,0}$	1000	88,2	250	360
ECC5-91-4	50	62,5	$\frac{157,0}{90,0}$	1500	89,3	315	490
ECC5-92-6	50	62,5	$\frac{157,0}{90,0}$	1200	89,6	315	540
ECC5-92-4	50	62,5	$\frac{157,0}{90,0}$	1000	89,6	315	540
ECC5-92-4	60	75,0	$\frac{188,5}{108,0}$	1500	90,5	315	540
ECC5-93-4	75	93,7	$\frac{—}{123,0}$	1800	91,0	315	605
ECC5-93-4	75	93,7	$\frac{235,0}{135,0}$	1500	91,0	315	605

* В числителе указаны значения тока $I_{\text{ном}}$ при $U_{\text{ном}} = 230$ В, в знаменателе — при $U_{\text{ном}} = 400$ В.

10.3. Гидрогенераторы серии СВ

Гидрогенераторы серии СВ предназначены для выработки электроэнергии переменного тока частотой 50 Гц, их устанавливают в закрытом помещении машинного зала. Привод осуществляется от гидротурбины поворотно-лопастного типа.

Структура обозначения гидрогенератора серии СВ:

СВ 1/2 3 4

СВ — синхронный, вертикальный;

1/2 — отношение наружного диаметра сердечника статора к его длине, см;

3 — количество полюсов;

4 — климатическое исполнение и категория размещения.

Условия эксплуатации: температура охлаждающего воздуха не выше +35 °С. Температура воды, поступающей в воздухоохладители и маслоохладители, не выше +20 °С.

По согласованию с заказчиком гидрогенераторы могут быть изготовлены с электромашинными возбудителями или с системой возбуждения на управляемых выпрямителях. Регулирование возбуждения автоматическое по отклонениям напряжения, тока или

частоты, а также, в случае необходимости, по производным этих величин.

Конструкция гидрогенераторов.

Гидрогенераторы зонтичного или подвесного исполнений. Статор разъемный, состоящий из пяти секторов. Сердечник статора набран из сегментов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, лакированных с обеих сторон. Сердечник статора по высоте состоит из пакетов, между которыми по вентиляционным каналам проходит охлаждающий воздух. Нажимные элементы сердечника выполнены из немагнитной стали.

Обмотка статора стержневая, волновая, двухслойная. Корпусная изоляция стержней обмотки, перемычек и шин термореактивная, по нагревостойкости соответствует классу F.

Конструкция ротора разъемная, состоит из остова, обода и полюсов. На торцах обода ротора встроены центробежные вентиляторы. Образованные пакетами вентиляционные каналы и центробежные вентиляторы обеспечивают эффективное охлаждение активных частей гидрогенератора. Полюса крепят к ободу ротора с помощью двух Т-образных хвостов каждый. Сердечники полюсов шихтованы из

Таблица 10.3. Технические данные некоторых типоразмеров гидрогенераторов серии СВ

Типоразмер	$S_{ном}$, МВ·А	$U_{ном}$, кВ	$I_{ном}$, А	$\cos \varphi_{ном}$	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	x_1	x_d	x_q	Масса, т	Исполнение
СВ1130/220-44	253,00	15,75	9280	0,85	136,4	97,10	0,137	1,05	0,60	1295	Зонтичное
СВ1260/235-60	206,00	15,75	7560	0,85	100,0	98,05	0,143	1,01	0,67	1350	
СВ1500/175-84	190,00	15,75	6960	0,90	71,5	98,20	0,174	1,09	0,73	1295	
СВ1420/190-80	150,00	13,80	6280	0,90	75,0	98,39	0,131	0,85	0,56	1230	
СВ1500/200-88	133,33	13,80	5580	0,90	68,2	97,77	0,093	0,54	0,36	1420	
СВ710/235-20	203,50	13,80	8515	0,85	300,0	98,00	0,109	1,05	0,69	770	Подвесное
СВ800/230-32	144,44	10,50	7940	0,90	187,5	98,10	0,143	1,16	0,78	790	
СВ627/230-20	127,70	11,00	6700	0,90	300,0	98,00	0,097	0,86	0,54	600	

стали толщиной 1 мм. Катушки полюсов выполнены из голый шинной меди специального профиля. Полюса ротора снабжены продольно-поперечной демпферной обмоткой.

Система вентиляции гидрогенератора радиальная, замкнутая с охлаждением воздуха в воздухоохладителях, размещенных на обшивке корпуса статора.

Гидрогенератор оснащен системами водо- и маслоснабжения, пожаротушения, теплового контроля защиты подпятника и подшипника.

В табл. 10.3 приведены технические данные некоторых типоразмеров гидрогенераторов серии СВ.

10.4. Гидрогенератор-двигатель типа ВГДС1025/245-40УХЛ4

Гидрогенератор-двигатель синхронный, трехфазного тока, вертикальный, с воздушной системой охлаждения, с тиристорной системой возбуждения по схеме самовозбуждения. Предназначен для работы на гидроаккумулирующей электростанции: выработки электрической энергии в режиме генератора и привода насоса для закачивания воды в водохранилище в режиме двигателя.

Структура обозначения гидрогенератора-двигателя ВГДС1025/245-40УХЛ4:

ВГДС — вертикальный гидрогенератор-двигатель синхронный;

1025 — наружный диаметр сердечника статора, см;

245 — длина сердечника статора, см;

40 — число полюсов;

УХЛ4 — климатическое исполнение и категория размещения.

Технические характеристики гидрогенератора-двигателя:

Номинальное напряжение	15,75 кВ
Частота переменного тока	50 Гц
Номинальная мощность	236 МВ · А
Номинальный ток статора	8650 А
Номинальная частота вращения	150 об/мин

Конструкция гидрогенератора-двигателя. Исполнение вертикальное, зонтичное, с одним направляющим подшипником, расположенным в крестовине, с опорой подпятника на крышку насоса-турбины.

Направление вращения ротора в генераторном режиме — левое, в двигательном режиме — правое.

Система возбуждения тиристорная с питанием двух параллельно включенных преобразователей от выпрямительного трансформатора без вольдобавочного трансформатора.

Обмотка статора двухслойная с четырьмя параллельными ветвями на фазу, имеет шесть выводов.

Конструкция гидрогенератора допускает разборку и замену стержней обмотки статора, полюсов ротора без выема ротора и снятия верхней крестовины.

Подпятник однорядный на гидравлической опоре с автоматическим выравниванием нагрузки между сегментами допускает работу в обоих направлениях вращения.

Сегменты подпятника выполнены с эластичными металлопластмассовыми накладками с фторопластовым покрытием.

Система смазки подпятника и подшипника замкнутая внутри масляных ванн без внешней циркуляции.

Для защиты гидрогенератора-двигателя типа ВГДС 1025/245-40УХЛ4 от масляных паров предусмотрен поддув воздуха от системы вентиляции в камеры уплотнения масляной ванны подпятника.

Конструкция направляющего подшипника и подпятника обеспечивает возможность контроля их состояния в процессе эксплуатации без разборки.

10.5. Турбогенераторы серий Т, ТВФ и ТВВ

Турбогенераторы предназначены для выработки электроэнергии в продолжительном номинальном режиме работы при непосредственном механическом соединении с паровыми или газовыми турбинами на тепловых или атомных электростанциях.

Турбогенераторы серии Т с воздушным охлаждением изготавливают мощностью от 2,5 до 20 МВт. При этом генераторы мощностью 2,5; 4; 6 и 12 МВт имеют воздушное *косвенное* охлаждение активных частей, когда охлаждающая среда (воздух) «омывает» наружную поверхность катушек, обмоток и сердечников. Генераторы мощностью 20 МВт имеют *непосредственное* воздушное охлаждение обмотки ротора, когда воздух циркулирует в каналах

внутри обмотки и «омывает» непосредственно провода этой обмотки, и воздушное *косвенное* охлаждение других активных частей (табл. 10.4).

Турбогенераторы имеют закрытое исполнение и самовентиляцию по замкнутому циклу. При этом воздух охлаждается специальными газоохладителями. В генераторах мощностью от 2,5 до 12 МВт таких газоохладителей два и расположены они горизонтально по бокам статора, а в генераторе мощностью 20 МВт их шесть и установлены они вертикально. Циркуляция охлаждающего воздуха создается двумя внутренними вентиляторами, расположенными по краям ротора.

Сердечник статора состоит из пакетов, разделенных вентиляционными каналами. Обмотка статора двухслойная с укороченным шагом.

Контроль за температурой нагрева обмоток генератора осуществляется термометрами сопротивления, установленными в местах наибольшего нагрева. Ротор генератора выполнен в виде цельной стальной поковки. В продольных пазах ротора размещена обмотка возбуждения. Изоляция обмоток

Таблица 10.4. Технические данные турбогенераторов серии Т (частота вращения 3000 об/мин, частота тока 50 Гц, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$)

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	$I_{\text{ном}}$, А	$\eta_{\text{ном}}$, %	U_B , В	I_B , А	Масса, кг
Т-2,5-2	2500	3150	572	97,2	83	243	12 500
Т-2,5-2	2500	6300	286	97,2	83	243	12 500
Т-4-2	4000	3150	916	97,4	113	274	15 000
Т-4-2	4000	6300	458	97,4	113	274	15 000
Т-6-2	6000	6300	687	97,6	140	248	20 000
Т-6-2	6000	10 500	412	97,6	139	246	20 000
Т-6-2	6000	6300	1376	97,6	230	291	20 000
Т-12-2	12 000	10 500	825	97,6	230	289	27 000
Т-20-2	20 000	6300	2295	97,6	190	545	60 000
Т-20-2	20 000	10 500	1375	97,6	192	548	60 000

Таблица 10.5. Технические данные турбогенераторов серии ТВВ

Типоразмер	$P_{ном},$ МВт	$S_{ном},$ МВ·А	$\eta_{ном}, \%$	$U_{ном},$ кВ	$n_{ном},$ об/мин	Общая масса, т	Масса ротора, т	Масса статора, т
ТВВ-160-2ЕУЗ	160	188,2	98,50	18,00	3000	165	31,0	115
ТВВ-220-2ЕУЗ	220	259,0	98,60	15,75	3000	220	42,2	170
ТВВ-220-3600	220	259,0	98,40	15,75	3600	220	35,0	154
ТВВ-320-2ЕУЗ	320	376,0	98,75	20,00	3000	257	48,3	178
ТВВ-320-2ЕКУЗ	320	376,0	98,75	20,00	3000	257	48,3	178
ТВВ-350-2УЗ	350	411,8	98,75	20,00	3000	322	55,0	207
7ВВ400-2УЗ	400	470,6	98,70	20,00	3000	322	55,0	207
ТВВ-500-2ЕУЗ	500	588,2	98,75	20,00	3000	340	62,7	211
ТВВ-500-2ЕКУЗ	500	588,2	98,75	20,00	3000	340	62,7	211
ТВВ-800-2ЕУЗ	800	889,0	98,80	24,00	3000	495	84,0	295
ТВВ-800-2ЕКУЗ	800	889,0	98,80	24,00	3000	495	84,0	295
ТВВ-1000-2УЗ	1000	1111,0	98,75	24,00	3000	540	86,5	330
ТВВ-1000-2КУЗ	1000	1111,0	98,75	24,00	3000	540	86,5	330
ТВВ-1000-4УЗ	1000	1111,0	98,75	24,00	1500	680	170,0	333
ТВВ-1000-4КУЗ	1000	1111,0	98,75	24,00	1500	680	170,0	333
ТВВ-1000-2/27ТЗ	1000	1176,4	98,71	27,00	3000	540	86,5	330
ТВВ-1000-2/27ТЗ	1000	1111,0	98,75	27,00	3000	540	86,5	330
ТВВ-1000-4/27ТЗ	1000	1111,0	98,75	27,00	1500	680	170,0	333
ТВВ-1200-2УЗ	1200	1333,0	98,80	24,00	3000	717	104,0	410

имеет класс нагревостойкости F. Лобовые части обмотки ротора закрыты немагнитными бандажами. Контактные кольца ротора выполнены из стальной поковки и насажены на вал с промежуточной изолирующей втулкой. Вал вращается в двух стояковых подшипниках скольжения с принудительной смазкой под давлением.

Турбогенераторы серии ТВФ мощностью 63, 100 и 110 МВт имеют водородное охлаждение. При этом обмотка ротора охлаждается водородом непосредственно, а обмотка статора охлаждается водородом косвенно. Корпус статора цилиндрический неразъемный газонепроницаемый. Обмотка статора трехфазная, двухслойная,

стержневая, выводы обмотки статора выполнены через изоляторы. Ротор цельнокованый, обмотка возбуждения уложена в прямоугольные пазы.

Вентиляция генератора выполняется по замкнутому циклу, циркуляция водорода обеспечивается двумя вентиляторами, установленными на противоположных концах вала. В генераторе имеются устройства теплового контроля основных узлов.

Турбогенераторы серии ТВВ являются более мощными (до 1200 МВт), что привело к необходимости применения в этих гидрогенераторах наиболее интенсивного водородно-водного способа охлаждения: обмотка ротора охлаждается непосредственно водородом, а

обмотка статора охлаждается непосредственно дистиллированной водой, при этом вся внутренняя полость генератора заполняется водородом. В обозначении типоразмеров буква Е означает принадлежность к единой унифи-

цированной серии; буква К — изготовление бандажных колец ротора из коррозионно-стойкой стали. Три типоразмера мощностью 1000 МВт выполнены четырехполюсными на частоту вращения 1500 об/мин (табл. 10.5).

ГЛАВА 11

СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ И КОМПЕНСАТОРЫ

11.1. Принцип работы и пуск синхронного двигателя

Принципиальных отличий в конструкции синхронного двигателя по сравнению с синхронным генератором нет. По сравнению с электродвигателями другого принципа действия (асинхронных и коллекторных) синхронные двигатели имеют два существенных отличия: их механическая характеристика абсолютно жесткая (см. рис. 1.4, график 1), т.е. при изменениях нагрузочного момента на валу синхронного двигателя в пределах допустимого значения его частота вращения остается неизменно равной синхронной частоте n_1 .

Выражения электромагнитных моментов, понятие об угле нагрузки, его номинальном и критическом значениях, а также угловые характеристики, приведенные в 9.5, применительно к синхронным генераторам, справедливы и для синхронных двигателей. Разница состоит лишь в том, что в генераторе электромагнитный момент тормозящий, а в синхронном двигателе вращающий.

Пуск синхронного двигателя. Основное отличие синхронного двигателя состоит в способе его пуска. Синхронный двигатель при подключении его

обмоток статора к источнику питания не развивает пускового момента, поскольку ротор из-за своей инерционности не может мгновенно достичь частоты вращения, равной частоте вращения магнитного поля статора, которая устанавливается почти одновременно с включением обмотки статора в сеть. Поэтому между полюсами возбужденного ротора и вращающегося поля статора не возникает устойчивой магнитной связи, создающей синхронный вращающий момент.

Для пуска синхронного двигателя необходимо предварительно привести ротор во вращение с частотой, близкой к частоте вращения поля статора. В этих условиях поле статора настолько медленно перемещается относительно полюсов вращающегося ротора, что при подключении обмотки возбуждения к источнику питания между полюсами ротора и вращающегося поля статора устанавливается магнитная связь, обеспечивающая возникновение синхронного электромагнитного момента. Под действием этого момента ротор втягивается в синхронизм, т.е. начинает вращаться с синхронной частотой.

Существует несколько способов пуска синхронного двигателя, но практическое применение получил

асинхронный способ. Для его реализации в пазах полюсных наконечников ротора располагают стержни пусковой короткозамкнутой обмотки, выполненной аналогично обмотке короткозамкнутого ротора (см. рис. 3.1). Обычно стержни этой обмотки делают из латуни или меди и замыкают с двух сторон медными кольцами (рис. 11.1, б).

Для пуска синхронного двигателя замыкают обмотку возбуждения ОВ на резистор r (рис. 11.1, а), включают в трехфазную сеть обмотку статора. Вращающееся поле статора индуцирует в стержнях пусковой обмотки ЭДС и в этих стержнях возникают токи. В результате взаимодействия этих токов с вращающимся полем статора на каждый стержень ротора действует электромагнитная сила $F_{эм}$. Совокупность таких сил создает на роторе асинхронный электромагнитный момент M_a , под действием которого ротор начинает вращаться в ту же сторону, что и поле статора. После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной ($n_2 \approx 0,95n_1$), обмотку возбуждения

ОВ подключают к источнику постоянного тока. При этом двигатель возбуждается (полюса ротора намагничиваются), между вращающимся полем статора и полюсами ротора устанавливается устойчивая магнитная связь, создающая синхронный электромагнитный момент M , и двигатель втягивается в синхронизм, т.е. его ротор начинает вращаться синхронно с вращающимся магнитным полем. При этом в пусковой обмотке ротора больше не наводится ЭДС, поэтому асинхронный момент $M_a = 0$. Короткозамкнутая пусковая обмотка в режиме синхронного вращения ротора исполняет роль *демпферной* (успокоительной) обмотки, ограничивая возможные колебания (качания) ротора, вызванные изменениями нагрузки на валу двигателя.

С ростом нагрузки двигателя вхождение его в синхронизм затрудняется. При нагрузке, превышающей допустимую, вхождения в синхронизм не происходит. Наибольший нагрузочный момент, при котором ротор синхрон-

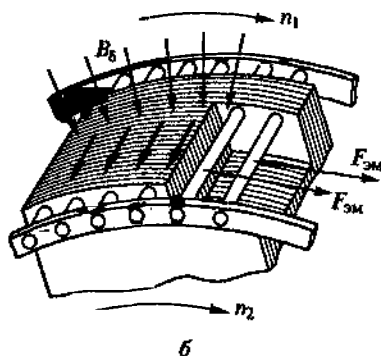
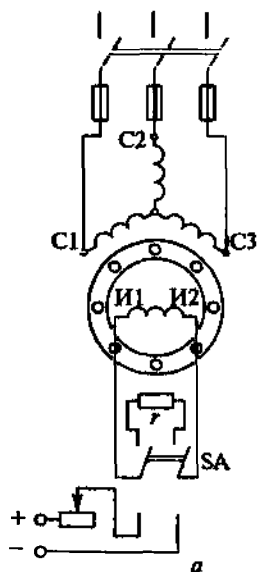


Рис. 11.1. Асинхронный пуск синхронного двигателя

ного двигателя еще вытягивается в синхронизм, называют *моментом входа двигателя в синхронизм* $M_{вх}$.

Величина асинхронного момента M_a при частоте вращения ротора $n_2 \approx 0,95n_1$ зависит от активного сопротивления пусковой клетки, т. е. от сечения стержней и удельного электрического сопротивления металла, из которого они изготовлены (см. рис. 4.5).

Следует обратить внимание, что выбор сопротивления пусковой клетки, соответствующего значительному пусковому моменту ($M_{п}^*$), способствует уменьшению момента входа в синхронизм ($M_{вх}^*$), и наоборот, при сопротивлении пусковой клетки, соответствующем небольшому пусковому моменту ($M_{п}^*$), момент входа в синхронизм увеличивается ($M_{вх}^* > M_{вх}^*$) (рис. 11.2).

В процессе асинхронного пуска обмотку возбуждения нельзя оставлять разомкнутой, так как магнитный поток статора, пересекающий ее в начальный период пуска с синхронной скоростью, индуцирует в ней ЭДС. Вследствие большого числа витков обмотки возбуждения эта ЭДС достигает значений, опасных как для обслуживающего персонала, так и для целостности изоляции обмотки. Для предотвращения этого опасного явления обмотку возбуждения на период разгона ротора замыкают на резистор с активным сопротивлением r , которое должно быть примерно в десять раз большим сопротивления обмотки возбуждения. Переключение зажимов И1 и И2 обмотки возбуждения с резистора r на клеммы возбуждателя осуществляют переключателем SA (см. рис. 11.1, а). Замыкание накоротко обмотки возбуждения на время пуска двигателя нежелательно, так как при этом обмотка ротора образует однофазный замкнутый контур, взаимодействие которо-

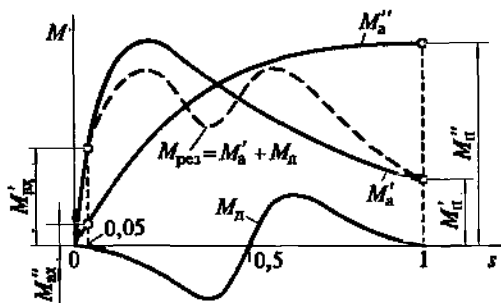


Рис. 11.2. Асинхронные моменты при пуске синхронного двигателя:

M_a — основной асинхронный момент; M_d — дополнительный момент; $M_{рез}$ — результирующий асинхронный момент; $M_{вх}$ — момент входа в синхронизм

го с вращающимся полем статора создает *дополнительный асинхронный момент* M_d . Однако при частоте вращения, равной половине синхронной, этот момент становится тормозящим (см. рис. 11.2) и создает «провал» в характеристике пускового (асинхронного) момента (пунктирная кривая). Это заметно ухудшает пусковые свойства синхронного двигателя.

При асинхронном пуске синхронного двигателя возникает значительный пусковой ток. Поэтому пуск синхронных двигателей непосредственным включением в сеть на номинальное напряжение применяют при достаточной мощности сети, способной выдерживать без чрезмерного падения напряжения броски пускового тока, в 5—7 раз превышающего номинальное значения. Если же мощность сети недостаточна, то можно использовать пуск двигателя при пониженном напряжении (автотрансформаторный или реакторный) или же применить электронное устройство «мягкого» пуска.

По своей конструкции синхронные двигатели в принципе не отличаются от синхронных генераторов, но все же имеют некоторые особенности. Их из-

готовляют преимущественно явнополюсными с числом полюсов от 4 до 24. Воздушный зазор делают меньшим, чем в генераторах такой же мощности, что способствует улучшению ряда параметров двигателя, в частности уменьшению пускового тока. Демпферную (успокоительную) обмотку выполняют из стержней большого сечения, так как при пуске двигателя она является пусковой обмоткой. Из изложенного следует, что, несмотря на свойства обратимости, синхронные машины, выпускаемые промышленностью, имеют целевое назначение — либо это синхронные генераторы, либо синхронные двигатели.

11.2. Характеристики синхронных двигателей

U-образные характеристики. В процессе работы синхронного двигателя в обмотке статора наводятся ЭДС, сумма которых приблизительно равна подведенному к обмотке статора напряжению сети. Эта сумма ЭДС эквивалентна результирующему магнитному полю, вызванному действием двух магнитодвижущих сил: МДС обмотки возбуждения F_v и МДС обмотки статора F_1 .

При стабильном напряжении сети результирующее магнитное поле постоянно. В связи с этим при изменении МДС возбуждения F_v (тока возбуждения I_v) МДС статора F_1 изменяется таким образом, что их совместное действие остается стабильным, т. е. остается неизменным результирующее магнитное поле синхронного двигателя.

Это изменение МДС F_1 может происходить только за счет значений и фазы тока статора I_1 , т. е. за счет изме-

нения реактивной составляющей этого тока. Например, при увеличении тока возбуждения I_v , начиная от наименьшего его значения, возрастает МДС возбуждения (ротора), при этом МДС статора уменьшается. Это происходит за счет снижения индуктивной (по отношению к напряжению сети) составляющей тока статора I_d , которая оказывает на магнитную систему подмагничивающее влияние.

При этом полный ток статора $\dot{I}_1 = \dot{I}_q + j\dot{I}_d$ уменьшается, а коэффициент мощности двигателя $\cos \varphi_1$ увеличивается. При некотором значении тока возбуждения I_v индуктивная составляющая тока статора падает до нуля. При этом ток статора достигнет минимального (при данной нагрузке) значения I'_v , так как станет чисто активным ($I_1 = I_q$), а коэффициент мощности $\cos \varphi_1 = 1$.

Увеличение тока возбуждения сверх значения I'_v , т. е. *перевозбуждение* двигателя, вызовет возрастание тока I_1 за счет его реактивной составляющей, но теперь этот ток будет опережающим (емкостным) по отношению к напряжению сети U_c . Таким образом, при *недовозбуждении* ($I_v < I'_v$) синхронный двигатель работает с отстающим током, а при *перевозбуждении* ($I_v > I'_v$) — с опережающим. Зависимость тока статора от тока возбуждения для синхронного двигателя представлена U-образными характеристиками (рис. 11.3, а). Ток возбуждения I'_v соответствует работе синхронного двигателя при коэффициенте мощности $\cos \varphi_1 = 1$. При перевозбуждении двигателя в цепи статора появляется опережающий ток. Иначе говоря, *синхронный двигатель является генератором реактивного тока: индуктивного по отношению к напряжению сети — при недовозбуждении и емкостного — при пере-*

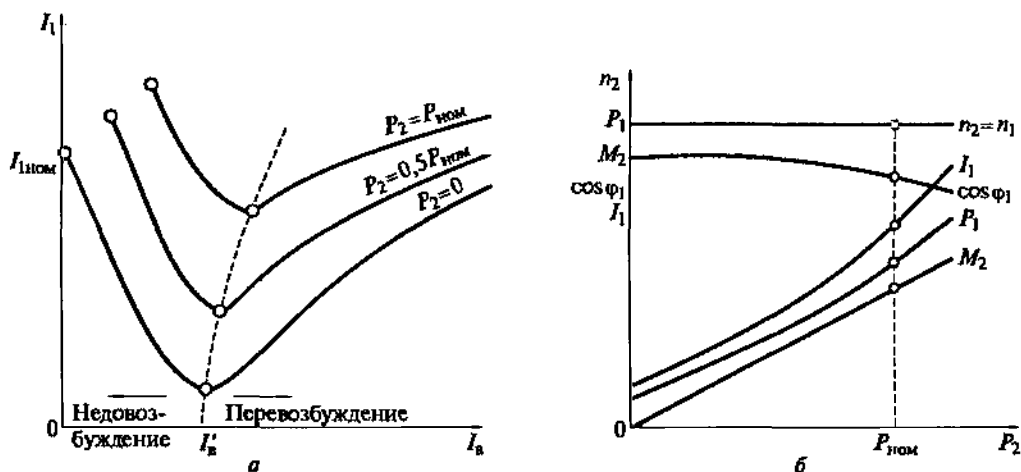


Рис. 11.3. Характеристики синхронного двигателя:
 а — U-образные характеристики; б — рабочие характеристики

возбуждения. Указанная способность синхронных двигателей является их ценным качеством, которое используют для повышения коэффициента мощности электрических установок, а следовательно, для энергосбережения.

Асинхронные двигатели, являющиеся наиболее распространенными потребителями электроэнергии, работают при $\cos \varphi_1 < 1$, создавая в сетях значительные индуктивные токи. Индуктивные токи увеличиваются при наличии в электросети трансформаторов. Если же параллельно группе асинхронных двигателей включить один или несколько синхронных двигателей, работающих с перевозбуждением, то возникающая в сети емкостная составляющая тока будет частично или полностью компенсировать индуктивную составляющую тока. При этом электрическая система разгружается от реактивных токов, что способствует снижению величины тока в линии, а следовательно, уменьшению потерь в ней, величина которых пропорциональна квадрату тока в линейных проводах. 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 при $\cos \varphi_1 = 1$, когда ток статора и потери двигателя имеют минимальные значения.

Рабочие характеристики. Эти 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. 11.3, б).

Частота вращения ротора всегда равна синхронной частоте $n_1 = f_1 60/p$, поэтому график $n_2 = f(P_2)$ имеет вид прямой, параллельной оси абсцисс.

Полезный момент на валу синхронного двигателя $M_2 = P_2/\omega_1$. Так как рабочие характеристики снимают при неизменной частоте вращения, то график $M_2 = f(P_2)$ имеет вид прямой, 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.

График $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ зависит от степени возбуждения двигателя в режиме холостого хода. Если при холостом ходе $\cos \varphi_1 = 1$, то при увеличении нагрузки он уменьшается (см. рис. 11.3, а).

Ток в обмотке статора двигателя определяется выражением

$$I_1 = \frac{P_1}{m_1 U_1 \cos \varphi_1}, \quad (11.1)$$

из которого 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 фазных обмоток статора. Для изменения направления вращения трехфазного синхронного двигателя необходимо переключить два линейных привода, подведенных из сети к выводам обмотки статора.

11.3. Назначение и принцип работы синхронных компенсаторов

Синхронный компенсатор СК представляет собой синхронную машину, предназначенную для генерирования реактивной мощности. Синхронный компенсатор включают в электрическую систему с целью по-

вышения ее коэффициента мощности. Принцип происходящих при этом явлений состоит в том, что необходимую для работы некоторых потребителей реактивную мощность вырабатывает не синхронный генератор электростанции, а синхронный компенсатор, установленный в непосредственной близости к потребителю и являющийся источником реактивной мощности.

К числу потребителей переменного тока, требующих значительной реактивной мощности, в первую очередь относятся асинхронные двигатели. На рис. 11.4 показана энергетическая система, состоящая из синхронного генератора Г, повышающего Т1 и понижающего ТП трансформаторов, линии электропередачи ЛЭП, потребителя Z и синхронного компенсатора СК, включенного непосредственно на входе потребителя. Синхронный компенсатор, включенный в сеть, работает как синхронный двигатель в режиме холостого хода ($P_2 = 0$), т.е. без нагрузки на валу, и при этом вырабатывает реактивную мощность $Q_{с.к.}$, необходимую для работы потребителя Z, например, группы асинхронных двигателей. Благодаря этому реактивная мощность в синхронном генераторе Г и ЛЭП доведена до минимального значения $Q_{\min}$, что способствует повышению экономических показателей всей электрической системы.

Синхронный компенсатор представляет собой синхронный двигатель, работающий в режиме холостого хода обычно с перевозбуждением.

Мощность синхронного компенсатора $Q_{с.к.}$, необходимая для повышения коэффициента мощности на каком-либо участке электрической системы от значения $\cos \varphi_1$ до значения

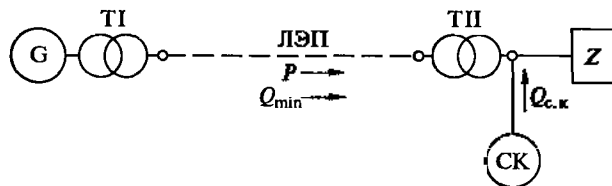


Рис. 11.4. Схема включения синхронного компенсатора СК в электрическую систему

$\cos \varphi'_1$, с некоторым приближением можно рассчитать по формуле

$$Q_{c.k} = S(\sin \varphi_1 - \sin \varphi'_1), \quad (11.2)$$

где S — полная мощность на данном участке электросистемы, $\text{kB} \cdot \text{A}$,

$$S = m_1 I_1 U_1 \cdot 10^{-3}; \quad (11.3)$$

φ_1 и φ'_1 — углы фазового сдвига между током I_1 и напряжением U_1 до и после подключения синхронного компенсатора соответственно.

Обычно коэффициент мощности повышают до значений 0,92—0,95, так как экономия от повышения коэффициента мощности до большего значения не оправдывает возросшими капитальными расходами на установку синхронного компенсатора, мощность которого возрастет при $\cos \varphi'_1 = 1$ почти в два раза.

Иногда синхронные компенсаторы работают с недовозбуждением. Необходимость в этом возникает в том случае, если ток в электросистеме содержит значительную емкостную составляющую, которая не компенсируется индуктивной составляющей тока, создаваемой потребителями данного участка электросистемы.

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 вначале; при малых нагрузках, наоборот, под влиянием емкостных сопротивлений линии электропередачи напряжение в конце линии может даже повышаться по сравнению с напряжением вначале. Если же в конце линии (у потребителей) включить синхронный компенсатор, работающий при больших нагрузках с перевозбуждением и при малых нагрузках с недовозбуждением, то это позволит поддерживать напряжение в конце линии практически неизменным.

Нагревание синхронного компенсатора при опережающем токе (при перевозбуждении) более интенсивное, чем при отстающем (при недовозбуждении), поэтому номинальной мощностью компенсатора считают его мощность при перевозбуждении.

Синхронные компенсаторы — это электрические машины большой реактивной мощности: от 10 до 160 тыс. квар. Выполняют их обычно с горизонтальным расположением вала на напряжение от 6,6 до 16 кВ при частоте 50 Гц. В синхронных компенсаторах современных серий применен асинхронный пуск, поэтому их роторы снабжены пусковыми клетками.

Вал компенсатора не передает вращающего момента, и поэтому при его расчете учитывают лишь силу тяжести ротора и силу магнитного притяжения. В итоге вал компенсатора по сравнению с валом синхронного двигателя имеет меньшее сечение, что

способствует уменьшению габаритов и массы синхронных компенсаторов. Так как вал СК не имеет выступающего конца, то компенсаторы сравнительно легко герметизировать для применения в нем водородного охлаждения.

Наиболее важными характеристиками синхронного компенсатора являются U-образные характеристики, определяющие основные параметры компенсатора: значения токов в обмотке статора и в обмотке возбуждения.

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

11.4. Синхронные явнополюсные двигатели серии СД2

Двигатели синхронные трехфазные со статической системой возбуждения общего назначения серии СД2 предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (насосы, вентиляторы и др.).

Структура обозначения типоразмера двигателя серии СД2:

<u>СД2</u>	<u>X/X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>
1	2	3	4

1 — СД2 — синхронный двигатель модификации 2;

2 — отношение наружного диаметра сердечника статора к его длине, см;

3 — количество полюсов;

4 — климатическое исполнение и категория места установки.

Двигатели предназначены для работы от сети переменного тока частотой 50 Гц. Номинальное напряжение двигателей 6000 В, коэффициент мощ-

ности (при опережающем токе) 0,9. Виды климатического исполнения УЗ и О4. Номинальный режим работы — продолжительный S1. Конструктивное исполнение по способу монтажа IM1001; способ охлаждения IC01; степень защиты IP21.

На базе двигателей, предназначенных для включения в сеть напряжением 6000 В, по желанию заказчика изготавливают двигатели на напряжение 3000 В путем переключения обмотки статора на удвоенное число параллельных ветвей. При этом ток статора увеличивается в два раза.

Двигатели поставляют в комплекте с тиристорным возбудительным устройством (ТВУ), которое обеспечивает:

- автоматическую подачу возбуждения в функции тока статора;

- увеличение тока возбуждения до $1,4I_{в.ном}$ при падении напряжения сети на 15—20 % от номинального значения;

- форсированное гашение поля ротора переводом преобразователя в инверторный режим;

- защиту двигателя от внутренних и внешних коротких замыканий.

Двигатели рассчитаны на прямой пуск от полного напряжения сети. Обмотка возбуждения при пуске должна быть замкнута на пусковое сопротивление, расположенное в возбудительном устройстве. Двигатели допускают два пуска подряд из холодного состояния и один пуск из горячего состояния. Двигатели имеют подшипники качения с пластичной смазкой.

С приводимыми механизмами двигатели соединяются посредством упругих муфт. Со стороны механизма на двигатель не должны передаваться радиальные и осевые нагрузки.

Изоляция обмотки статора термо-реактивная типа «Монолит-2» класса нагревостойкости не ниже В. Изоляция обмотки ротора класса нагревостойкости В. Соединение фаз обмотки статора «звездой». Обмотка статора имеет шесть выводных концов.

Двигатели допускают правое и левое направления вращения. Реверс осуществляется только из состояния покоя.

Технические данные двигателей серии СД2 приведены в табл. 11.1.

Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей при-

Таблица 11.1. Технические данные синхронных явнополюсных двигателей общего назначения на напряжение 6000 В частотой 50 Гц

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$I_{ном}$, А	$M_{пик}/M_{ном}$	$M_{п}/M_{ном}$	$I_{к}/I_{ном}$	Масса, кг
СД2-85/57-6	800	1000	95,6	90,0	2,2	1,0	5,9	2945
СД2-85/47-10	400	600	93,6	45,5	2,2	1,1	5,3	2565
СД2-85/40-10	315	600	93,1	36,5	2,2	1,1	5,3	2310
СД2-74/47-6	400	1000	94,6	45,5	2,2	1,1	5,7	2060
СД2-85/57-10	450	600	94,1	51,0	2,2	1,2	5,9	2925
СД2-85/45-6	560	1000	95,2	63,0	2,2	1,0	6,2	2420
СД2-85/37-6	450	1000	94,7	51,0	2,2	1,0	6,2	2240
СД2-74/41-6	280	1000	94,3	32,0	2,2	1,2	6,4	905
СД2-85/57-10	500	600	94,0	57,0	2,2	1,1	5,3	2925
СД2-85/45-6	630	1000	95,1	71,0	2,2	0,9	5,6	2420
СД2-85/37-6	500	1000	94,7	56,5	2,2	0,9	5,6	2240
СД2-7441-6	315	1000	94,2	36,0	2,2	1,1	5,7	905
СД2-85/57-8	560	750	94,9	63,0	2,2	1,0	6,2	3030
СД2-85/47-8	450	750	94,5	51,0	2,2	1,0	6,2	2650
СД2-85/40-8	355	750	94,1	40,5	2,2	1,0	6,2	2325
СД2-74/49-8	280	750	93,9	32,0	2,2	1,4	6,2	2130
СД2-85/57-8	630	750	94,8	71,0	2,2	0,9	5,5	3030
СД2-85/47-8	500	750	94,3	57,0	2,2	0,9	5,5	2650
СД2-85/40-8	400	750	93,9	45,5	2,2	0,9	5,5	2325
СД2-74/49-8	315	750	93,9	36,0	2,2	1,3	5,5	2130
СД2-85/57-6	710	1000	95,6	79,5	2,2	1,2	6,7	2945
СД2-85/47-10	355	600	93,8	40,5	2,2	1,2	6,0	2565
СД2-85/40-10	280	600	93,3	32,0	2,2	1,2	6,0	2310
СД2-74/47-6	355	1000	94,7	40,5	2,2	1,2	6,4	2060

ведены на рис. 11.5 и в табл. 11.2. Аналогично синхронным двигателям на напряжение 6000 В изготавливают двига-

тели серии СД2 на напряжение 380 В. Технические данные этих двигателей приведены в табл. 11.3.

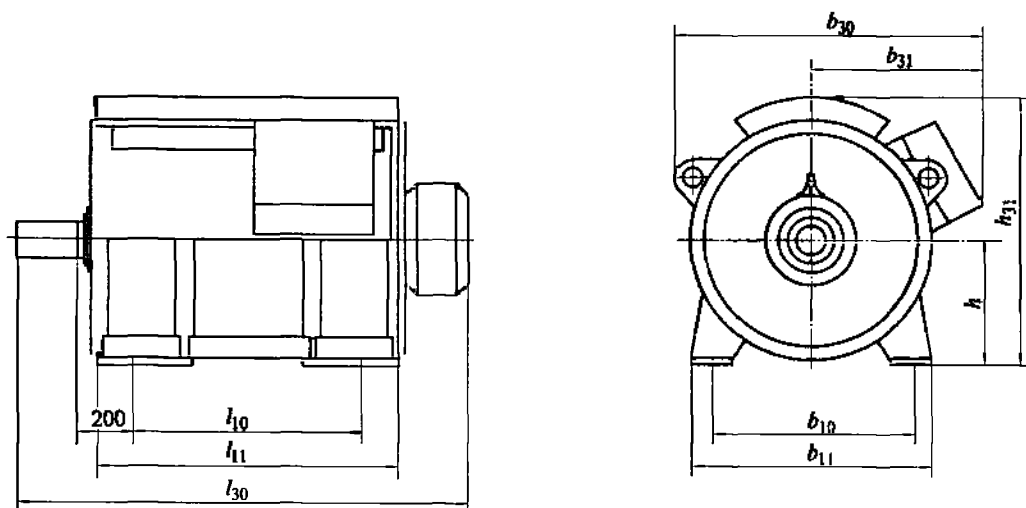


Рис. 11.5. Размеры двигателя серии СД2 (см. табл. 11.2)

Таблица 11.2. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей серии СД2 на напряжение 6000 В исполнения по способу монтажа IM1001 (см. рис. 11.5)

Размеры сердечника статора и число полюсов	Размеры, мм								
	b_{10}	b_{11}	b_{30}	b_{31}	l_{10}	l_{11}	l_{30}	h	h_{31}
74/41-6	710	850	1090	608	800	1054	1615	450	945
74/47-6	710	850	1090	608	800	1054	1615	450	945
74/49-8	710	850	1090	608	800	1054	1615	450	945
85/37-6	800	940	1185	652	710	994	1555	500	1035
85/40-10	800	940	1185	652	710	994	1555	500	1035
85/40-8	800	940	1185	652	710	994	1555	500	1035
85/45-6	800	940	1185	652	800	1074	1635	500	1035
85/47-10	800	940	1185	652	800	1074	1635	500	1035
85/47-8	800	940	1185	652	800	1074	1635	500	1035
85/57-10	800	940	1185	652	900	1194	1755	500	1035
85/57-6	800	940	1185	652	900	1194	1755	500	1035
85/57-8	800	940	1185	652	900	1194	1755	500	1035

**Таблица 11.3. Технические данные синхронных явнополусных двигателей
общего назначения на напряжение 380 В частотой 50 Гц**

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$I_{ном}$, А	$M_{max}/M_{ном}$	$M_p/M_{ном}$	$I_p/I_{ном}$	Масса, кг
СД2-85/29-12	200	500	92,4	366	2,2	1,1	4,5	1940
СД2-85/22-12	160	500	91,5	296	2,2	1,0	4,0	1750
СД2-74/33-6	315	1000	94,2	565	2,2	1,1	5,6	1660
СД2-74/27-8	200	750	93,0	363	2,2	1,2	5,2	1450
СД2-85/35-10	280	600	93,9	505	2,2	1,4	6,2	2160
СД2-74/40-6	355	1000	94,8	635	2,2	1,2	6,4	1880
СД2-85/22-10	180	600	92,5	328	2,2	1,3	5,2	1660
СД2-85/18-12	125	500	91,1	232	2,2	1,1	4,2	1540
СД2-74/25-6	225	1000	93,8	406	2,2	1,1	5,5	1435
СД2-85/35-10	315	600	93,8	568	2,2	1,3	5,5	2160
СД2-74/40-6	400	1000	94,7	715	2,2	1,1	5,7	1880
СД2-85/22-10	200	600	92,3	366	2,2	1,2	4,7	1660
СД2-85/18-12	132	500	90,9	246	2,2	1,0	4,0	1540
СД2-74/25-6	250	1000	93,7	451	2,2	1,1	5,5	1435
СД2-85/29-10	225	600	93,4	407	2,2	1,3	5,6	1960
СД2-74/40-8	280	750	94,2	503	2,2	1,4	6,1	1860
СД2-74/33-8	225	750	93,8	406	2,2	1,3	5,8	1660
СД2-85/18-10	140	600	92,1	258	2,2	1,2	4,9	1500
СД2-85/29-10	250	600	93,2	453	2,2	1,2	5,0	1960
СД2-74/40-8	315	750	94,0	567	2,2	1,3	5,4	1860
СД2-74/33-8	250	750	93,5	451	2,2	1,2	5,2	1660
СД2-85/18-10	160	600	91,8	295	2,2	1,1	4,3	1500
СД2-85/35-12	225	500	93,3	408	2,2	1,2	5,1	2140
СД2-85/29-12	180	500	92,6	329	2,2	1,2	5,0	1940
СД2-85/22-12	140	500	91,9	258	2,2	1,1	4,6	1750
СД2-74/33-6	280	1000	94,3	501	2,2	1,2	6,3	1660
СД2-74/27-8	180	750	93,2	327	2,2	1,3	5,8	1450
СД2-85/35-12	250	500	92,9	455	2,2	1,1	5,0	2140

11.5. Синхронные двигатели серий СДН, СДНЗ, СДСЗ

Двигатели синхронные серий СДН, СДНЗ и СДСЗ предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (вентиляторов, насосов, дефибреров, рубильных машин и т. п.). Двигатели работают от сети переменного тока частотой 50 Гц напряжением 6 кВ и 10 кВ. Режим работы продолжительный S1.

Пуск двигателей асинхронный, прямой, от полного напряжения сети с включенным в цепь обмотки возбуждения разрядным резистором. В процессе пуска среднее напряжение на зажимах двигателей должно быть не менее $0,85 U_{ном}$, минимальное напряжение в начале пуска — не ниже $0,7 U_{ном}$ или $0,8 U_{ном}$ (для различных типов двигателей).

Двигатели допускают два пуска подряд с интервалом между ними 5 мин

из холодного состояния или один пуск из горячего состояния. Интервал между следующими пусками не менее двух часов.

Исполнение двигателей по способу защиты и способу охлаждения:

а) двигателей СДН исполнение открытое (степень защиты IP00); способ охлаждения IC01;

б) двигателей СДНЗ и СДСЗ исполнение закрытое (степень защиты IP44); способ охлаждения ICW37A91 (замкнутая воздушная система самовентиляции, охладитель водяной установлен в фундаментной яме).

Двигатели устанавливают на фундаментных балках, на стояковых подшипниках скольжения с комбинированной смазкой, с горизонтальным положением вала с одним выступающим концом.

В двигателях применена изоляция класса нагревостойкости В; предусмотрен контроль температуры обмотки и сердечника статора, подшипников и

Таблица 11.4. Технические данные синхронных явнополюсных двигателей серий СДН, СДНЗ, СДСЗ

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	КПД, %	Масса, кг
СДН2-18-64-12	2500	6000	500	96,2	17 000
СДНЗ2-20-49-20	3150	6000	300	96,0	22 000
СДНЗ2-19-49-24	1600	6000	250	95,3	17 000
СДНЗ-17-59-8	4000	10 000	750	96,0	28 700
СДНЗ-18-91-12	6300	10 000	500	96,4	50 100
СДСЗ-17-76-12	3200	10 000	500	96,0	37 800
СДСЗ-17-41-12	1600	10 000	500	93,6	21 000
СДНЗ-17-59-12	3200	6000	500	96,0	22 400
СДНЗ-17-49-12	2500	6000	500	95,5	22 000
СДНЗ-18-94-16	6300	6000	375	96,5	50 300
СДНЗ-18-61-16	4000	6000	375	96,0	37 000
СДСЗ-20-49-60	2000	10 000	100	93,5	46 500
СДНЗ2-18-34-24	500	6000	250	92,8	8900

воды на входе и выходе воздухоохладителя.

Обмотка статора соединена «звездой»; шесть концов обмотки выведены в фундаментную яму (у двигателя СДН2 — в коробку выводов).

Возбуждение двигателей осуществляется от тиристорных возбудителей серии ТВУ-315 с системой управления и автоматического регулирования тока возбуждения.

Структура обозначения двигателей:

<u>XXX</u>	<u>X</u>	<u>XX</u>	<u>XX</u>	<u>XX</u>	<u>XXXX</u>
1	2	3	4	5	6

1 — серии (СДН — синхронный двигатель нормальный; СДН3 — синхронный двигатель нормальный закрытый; СДС3 — синхронный двигатель специальный закрытый);

2 — номер серии (2);

3 — условный номер габарита, например 17, 18 и т.д.;

4 — длина сердечника статора, см;

5 — число полюсов;

6 — климатическое исполнение (УХЛ, Т) и категория места размещения (3 или 4).

Технические данные синхронных двигателей серий СДН, СДН3, СДС3 приведены в табл. 11.4.

11.6. Синхронные явнополюсные двигатели серии СДКП2

Синхронные явнополюсные двигатели серии СДКП2 предназначены для привода компрессоров в продолжительном режиме работы во взрывоопасных зонах помещений всех классов, за исключением наружных установок (см. 7.4). В качестве защитного газа для заполнения или продувки оболочки при избыточном давлении используется воздух.

Двигатели рассчитаны для включения в сеть переменного тока частотой

50 Гц, напряжением 6000 В. Пуск двигателей асинхронный, прямой от полного напряжения сети с включением в цепь обмотки возбуждения разрядного резистора. В процессе пуска среднее напряжение на зажимах двигателя должно быть не менее $0,85 U_{ном}$.

Допускается два пуска с интервалом между ними 5 мин при холодном состоянии или один пуск при горячем состоянии. Интервал между последующими пусками не менее двух часов.

Исполнение двигателей по способу защиты закрытое IP44; способ охлаждения — замкнутая система самовентилиации с водяным газоохладителем, встроенным в двигатель, ICW37A81 — для двигателей 18-го габарита и с водяным газоохладителем, установленным в фундаментной яме, ICW37A91 — для двигателей 19, 20 и 21-го габаритов.

Конструктивное исполнение двигателей — с горизонтальным расположением вала на фундаментных балках с одним стоячковым подшипником скольжения с кольцевой смазкой.

Двигатели имеют маркировку по взрывозащите IExIIPT5 (см. 7.4).

Изоляция обмотки статора имеет класс нагревостойкости не ниже В. Обмотка статора соединена «звездой». Шесть концов обмотки выведены в коробку выводов (для двигателей 18 и 19 габаритов) или в фундаментную яму (для двигателей 20 и 21 габаритов).

Возбуждение осуществляется от тиристорных возбудителей с системой управления и автоматического регулирования тока возбуждения. Возбудители устанавливаются во взрывоопасной зоне и должны иметь взрывозащищенное исполнение.

В двигателях предусмотрен контроль температуры нагрева обмотки и сер-

Таблица 11.5. Технические данные синхронных явнополюсных двигателей серии СДКП2

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	КПД, %	Масса, кг
СДКП2-18-26-16	800	6000	375	93,8	8000
СДКП2-18-34-16	1000	6000	375	94,6	9200
СДКП2-18-41-16	1250	6000	375	94,8	11 800
СДКП2-18-51-16Ф	1600	6000	375	95,5	14 100
СДКП2-19-39-16	2000	6000	375	95,6	15 340
СДКП2-19-51-16	2000	10 000	375	95,5	14 100
СДКП2-19-61-16	3150	6000	375	96,2	20 500
СДКП2-20-49-16Ф	4000	6000	375	96,2	22 500
СДКП2-20-56-16Ф	4000	10 000	375	96,4	24 000
СДКП2-20-61-16Ф	5000	6000	375	96,5	25 900
СДКП2-20-61-16МФ	5000	6000	375	96,5	25 900
СДКП2-21-46-20Ф	5000	6000	300	96,3	28 900
СДКП2-21-69-20Ф	6300	10 000	300	96,7	41 000
СДКП2-21-56-24Ф	5000	6000	250	96,3	34 000

лечника статора, подшипников и воды на входе и выходе газоохладителей. Технические данные синхронных двигателей серии СДКП2 приведены в табл. 11.5.

Структура обозначения двигателей серии СДКП2:

XXXX X XX XX XX X XXXX
 1 2 3 4 5 6 7

1 — СДКП — синхронный двигатель для привода компрессора, взрывозащищенный;

2 — номер серии (2);

3 — условный номер габарита, например 18, 19 и т.д.;

4 — длина сердечника статора, см;

5 — число полюсов;

6 — фланцевое исполнение рабочего конца вала Ф (в некоторых типоразмерах);

7 — климатическое исполнение (УХЛ) и категория места размещения (4).

Буква М в обозначении марок двигателей указывает на модернизацию этих типоразмеров, а буква Ф — на фланцевое исполнение конца вала.

11.7. Синхронные турбодвигатели серии СТД

Синхронные турбодвигатели предназначены для привода насосов, компрессоров, нагнетателей, воздуходувок и других быстроходных механизмов.

Турбодвигатели представляют собой неявнополюсные (двухполюсные) синхронные машины, в которых ротор имеет вид «бочки» с профрезерованными пазами для укладки обмотки возбуждения. Обмотка статора двухслойная катушечного или стержневого типа.

Охлаждение двигателей мощностью до 5000 кВт выполняется по замкнутому или разомкнутому циклу. При замкнутом цикле используют водяные газоохладители. При мощности 6300 кВт и более применяют только замкнутую систему вентиляции.

Степень защиты IP23 или IP43. Возбуждение осуществляется от тиристорных возбудителей серии ВТЕ 10-315.

Таблица 11.6. Технические данные синхронных турбодвигателей серии СТД

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$S_{ном}$, кВт·А	$\eta_{ном}$, %, при напряжении, кВ		Масса, т	
			6	10	Замкнутый цикл вентиляции	Разомкнутый цикл вентиляции
СТД-630-2УХЛ4	630	735	95,8	95,6	4,96	4,25
СТД-800-2УХЛ4	800	935	96,0	95,8	5,13	4,45
СТД-1000-2УХЛ4	1000	1160	96,3	96,0	5,56	5,00
СТД-1000-23У5	1000	1160	96,3	96,0	5,56	—
СТД-1250-2УХЛ4	1250	1450	96,8	96,5	6,98	6,49
СТД-1600-2УХЛ4	1600	1850	96,9	96,6	7,58	6,70
СТД-1600-23У5	1600	1850	96,9	96,6	7,58	—
СТД-2000-2УХЛ4	2000	2300	96,9	96,8	7,88	7,00
СТД-2500-2УХЛ4	2500	2870	97,2	97,0	11,10	10,00
СТД-3150-2УХЛ4	3150	3680	97,3	97,2	12,30	11,06
СТД-4000-2УХЛ4	4000	4580	97,5	97,4	12,92	11,58
СТД-5000-2УХЛ4	5000	5740	97,6	97,5	154,70	13,70
СТД-6300-2УХЛ4	6300	7240	97,6	97,5	31,30	—
СТД-8000-2УХЛ4	8000	9130	97,9	97,7	23,95	—
СТД-10000-2УХЛ4	10 000	11 400	97,8	97,9	26,52	—
СТД-12500-2УХЛ4	12 500	14 200	97,9	97,8	29,50	—

Исполнение двигателей по способу монтажа IM7311 — с двумя стояковыми подшипниками, на лапах, с одним выступающим цилиндрическим концом вала.

Структура обозначения турбодвигателей серии СТД:

<u>XXX</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>XX</u>
1	2	3	4

1 — СТД — синхронный турбодвигатель;

2 — мощность, кВт;

3 — число полюсов (2);

4 — климатическое исполнение (УХЛ) и категория места размещения (4).

Технические данные синхронных турбодвигателей серии СТД приведены в табл. 11.6.

11.8. Синхронные компенсаторы серий КС и КСВ

Синхронные компенсаторы серий КС и КСВ, работающие в двигательном режиме без активной нагрузки, предназначены для генерирования в питающую сеть реактивный опережающий (емкостной) ток или отстающий (индуктивный) ток. При мощности 16 МВ·А компенсаторы изготавливают закрытыми с воздушным охлаждением по замкнутому циклу. При мощности 50, 100 и 160 МВ·А компенсаторы изготавливают с водородным охлаждением.

Технические данные синхронных компенсаторов серий КС и КСВ приведены в табл. 11.7.

Таблица 11.7. Технические данные синхронных компенсаторов серий КС и КСВ

Типоразмер	$S_{ном},$ МВ·А	$U_{ном},$ кВ	$n_{ном},$ об/мин	Возбуждение		Масса, т	$\sum P,$ кВт
				$U_b,$ В	$I_b,$ А		
КС16-6	16	6,30	1000	110	590	49,7	360
КС16-11	16	10,50	1000	110	580	50,2	370
КСВ50-11	50	11,00	750	160	1160	144,5	800
КСВ100-11	100	11,00	750	230	1350	220,0	1350
КСВ160-15	160	15,75	750	380	1600	303,0	1750

11.9. Возбудители тиристорные для синхронных машин

Тиристорные возбудители серии ВТ предназначены для возбуждения гидро- и турбогенераторов малой мощности, синхронных двигателей и компенсаторов. В комплект ВТ входит: трансформатор Т, автоматический выключатель QF, тиристорный преобразователь ТП со схемой управления, регулирования и защиты СУ, резистор самосинхронизации R_c и тиристорный разрядник FA (рис. 11.6). Типоразмер возбудителя ВТ-500Т дополнительно содержит выключатели для отключения основного и подключения резервного возбудителя.

Напряжение питания 380 В частотой 50 Гц; для типоразмеров ВТ-400,

ВТ-500 и ВТ-500Т возможно напряжение питания 380 В или 6,3 и 10,5 кВ. Исполнение шкафа по степени защиты IP21, охлаждение воздушное естественное.

Основные технические данные тиристорных возбудителей серии ВТ представлены в табл. 11.8.

Для типоразмера ВТ-320 схема возбуждения независимая, для других типоразмеров — независимая или самовозбуждение.

Возбудители серии ВТ обеспечивают:

- автоматическую подачу возбуждения при пуске двигателя или включении генератора в сеть методом самосинхронизации в функции скольжения (для двигателей) или частоты и фазы ЭДС (для генераторов);

- постоянство заданного тока возбуждения с точностью $\pm 5\%$ при колебаниях напряжения питающей сети в диапазоне от 70 до 110 % от номинального;

- местное управление уставкой тока возбуждения;

- гашение тока возбуждения инвертированием при отключении двигателя или генератора от сети;

- ограничение минимального и максимального значений тока возбуждения.

Возбудитель обеспечивает защиту от короткого замыкания возбудителя и

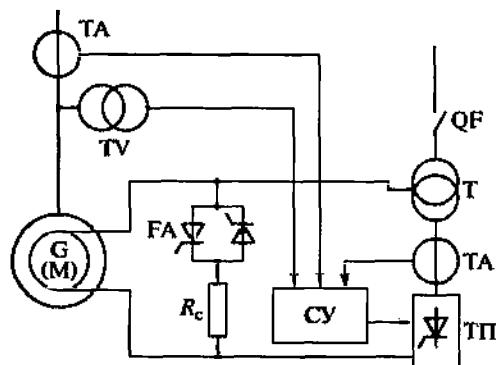


Рис. 11.6. Функциональная схема тиристорного возбудителя серии ВТ

Таблица 11.8. Основные технические данные тиристорных возбудителей серии ВТ

Типоразмер	Диапазон номинальных напряжений на выходе, В	Диапазон номинальных значений постоянного тока, А	Кратность форсировки по току	Продолжительность форсировки, с
ВТ-320	48—210	160—320	2	60
ВТ-400	48—230	160—400	2	60
ВТ-500	115—230	400—500	2	20
ВТ-500Т	150—230	220—500	2	20

Таблица 11.9. Технические данные тиристорных возбудителей серии ВТЕ

Типоразмер	Мощность на выходе, кВт	Номинальное напряжение на выходе, В	Номинальный постоянный ток, А	КПД, %	Масса, кг (возбудитель + трансформатор)
ВТЕ10-315/48Т	15,1	48	315	91,4	350 + 390
ВТЕ10-315/75Т	23,6	75	315	93,0	431 + 665
ВТЕ10-315/115Т	36,2	115	315	94,1	505 + 865
ВТЕ10-315/150Т	47,3	150	315	94,2	603 + 865
ВТЕ10-315/230Т	72,5	230	315	95,3	643 + 865

перегрева резистора самосинхронизации.

Тиристорные возбудители серии ВТЕ (возбудитель тиристорный с естественным охлаждением). Возбудители предназначены для питания постоянным током обмотки возбуждения и управления этим током при прямом или реакторном пуске, синхронном вращении и аварийных режимах синхронных двигателей серий СТДМ, СТД, СДК, СДКП, СДГМ, ДС, ДСК.

В табл. 11.9 приведены технические данные тиристорных возбудителей серии ВТЕ. Возбудители получают питание от трехфазной сети частотой 50 Гц напряжением 380 В и частотой 60 Гц напряжением 440 В. Возбудители для высоковольтных двигателей конструктивно выполняются в шкафах со степенью защиты IP21, климатическое исполнение УХЛ, категория размещения 4. В возбудителе применена схема

выпрямления трехфазная с нулевым выводом. Возбудители имеют ручной и автоматический способы регулирования возбуждения. Комплектно с возбудителем поставляется силовой согласующий трансформатор.

Тиристорные возбудители серии ТВУ обеспечивают:

- автоматическую подачу тока возбуждения в функции тока статора;

- форсировку тока возбуждения до $1,4I_{\text{в.ном}}$ при падении напряжения в сети на 15—20 % от его номинального значения;

- ограничение напряжения возбуждения по его минимальному значению и тока возбуждения по его наибольшему значению;

- форсированное гашение поля ротора переводом выпрямителя в инверторный режим;

- защиту от внутренних и внешних коротких замыканий.

Таблица 11.10. Технические данные тиристорных возбудителей серии ТВУ-315

Типоразмер	Мощность на выходе, кВт	Номинальное напряжение на выходе, В	Схема выпрямления	Номинальный постоянный ток, А	КПД, %	Масса, кг
ТВУ-315/48Т	15,1	48	Трехфазная с нулевым выводом	315	91,4	360
ТВУ-315/75Т	23,6	75		315	93,0	360
ТВУ-315/115Т	36,2	115		315	94,1	360
ТВУ-315/150Т	47,3	150	Трехфазная мостовая	315	94,2	360
ТВУ-315/230Т	72,5	230		315	95,3	360

Технические данные возбудителей серии ТВУ-315 приведены в табл. 11.10.

Тиристорный агрегат возбуждения типа АТВ предназначен для регулирования тока возбуждения мощных синхронных двигателей в приводах насосов, вентиляторов, компрессоров и т. п. Он обеспечивает: уверенный пуск двигателя с автоматической подачей возбуждения с необходимой выдержкой времени; защиту при аномальных режимах и диагностику причин отключения; возможность регулирования тока возбуждения по значениям коэффициента мощности двигателя.

Технические данные агрегата:

Номинальный
выпрямленный ток 250 А

Диапазон регулировки

тока 140—260 А

Погрешность регулирования

(не более) 2 %

Сопротивление

пускового резистора 1,5 Ом

Напряжение питающей

сети 380 В

Габаритные размеры

шкафа 800×600×300 мм

Масса 50 кг

Агрегат обеспечивает управление возбуждением синхронного двигателя как в рабочем (синхронном) режиме, так и при асинхронном пуске.

Тиристорный агрегат имеет световую сигнализацию о наличии напряжения питания и причине аварийного отключения.

ГЛАВА 12

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ НЕТРАДИЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

12.1. Индукторные синхронные машины

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 лишь изменяется от $\Phi_{\max}$ до $\Phi_{\min}$, т. е. пульсирует (рис. 12.1, а). Пульсирующий поток состоит из двух составляющих: постоянной $\Phi_{\text{ср}}$ и переменной $\Phi_{\text{пер}}$, представляющей собой периодически изменяющийся как по величине, так и по направлению магнитный поток с амплитудой $\Phi_{\text{пер}} =$

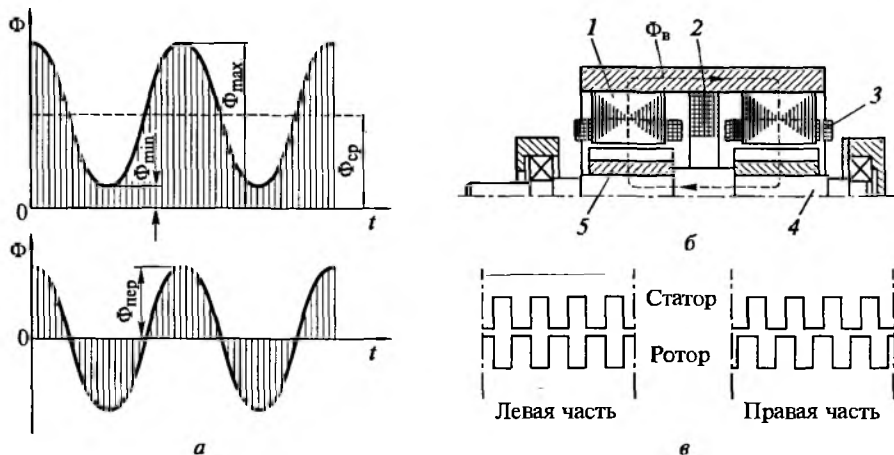


Рис. 12.1. Индукторный генератор сдвоенного типа:

а — график магнитного потока; *б* — устройство генератора; *в* — взаимное расположение зубцов

$= 0,5(\Phi_{\max} - \Phi_{\min})$. Постоянная составляющая потока не индуцирует в обмотках ЭДС, а переменная составляющая, сцепляясь с рабочей обмоткой генератора, индуцирует в ней ЭДС.

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 паз ротора расположен против зубца статора, 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 :

$$f_1 = \frac{Z_2 n_2}{60}.$$

Рассмотрим одну из конструкций индукторного генератора, называемую сдвоенной (рис. 12.1, б). Статор 1 и ротор 5 генератора выполнены сдвоенными. Обмотка возбуждения 2, располагаемая на статоре, подключена к источнику постоянного тока и создает магнитный поток, замыкающийся вдоль вала ротора 4, при этом на каждой части статора (и ротора) возбуждаются полюсы одной полярности. Число зубцов на статоре и на роторе одинаково. Пульсации магнитного потока происходят за счет смещения зубцов вращающегося ротора относительно зубцов статора. На каждом зубце статора расположена катушка 3, в которой переменной составляющей магнитного потока наводится ЭДС.

Весьма важным в индукторных генераторах является обеспечение постоянства общего магнитного потока при вращении ротора, так как в противном случае в обмотке возбуждения 2 будет индуцироваться ЭДС высокой частоты. В рассматриваемом индукторном генераторе постоянство общего магнитного потока обмотки возбужде-

ния обеспечивается тем, что один пакет ротора смещен относительно другого пакета на половину зубцового деления (рис. 12.1, в). Благодаря этому магнитное сопротивление суммарному потоку возбуждения остается неизменным при любом положении ротора, что позволило сделать ротор генератора стальным монолитным (а не шихтованным) с профрезерованными пазами.

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, что упрощает конструкцию генератора и повышает его надежность.

Генераторы индукторного типа применяют в качестве возбудителей турбогенераторов некоторых серий. В индукторных генераторах небольшой мощности вместо обмотки возбуждения применяют постоянные магниты.

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 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 $n_1 = 50 \cdot 60 / 100 = 30$ об/мин.

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

12.2. Синхронные генераторы с когтеобразными полюсами

Синхронные генераторы с когтеобразными полюсами применяются в качестве источника постоянного тока в автотранспортных устройствах. С этой целью на выходе генератора включают полупроводниковый выпрямитель (рис. 12.2, а). Возбуждение генератора осуществляется одной катушкой 2 цилиндрической формы, расположенной на ферромагнитной втулке 1 ротора. Полюса ротора имеют когтеобразную конструкцию, при этом половина полюсов примыкает к левой шай-

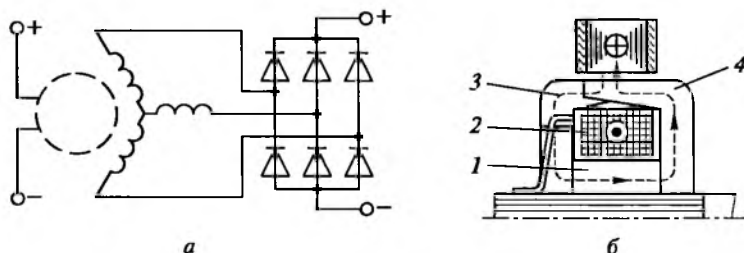


Рис. 12.2. Схема включения (а) и магнитная система (б) синхронного генератора с когтеобразными полюсами

бе 3 ротора, а половина — к правой шайбе 4. Такая конструкция позволяет получить при сравнительно небольшом диаметре ротора требуемое количество полюсов, полярность которых чередуется. Катушка возбуждения подключается к источнику постоянного тока через контактные кольца и щетки. В таком роторе аксиально направленный магнитный поток возбуждения в воздушном зазоре меняет свое направление и становится радиально направленным (рис. 12.2, б). Рассматриваемый генератор отличается простотой конструкции, компактностью, надежностью и высокой технологичностью. Генератор включают параллельно с аккумуляторной батареей, и он работает с ней в буферном режиме, т.е. они энергетически дополняют друг друга. Обычно эти генераторы изготавливают мощностью не более 1 кВт·А. В некоторых конструкциях катушку возбуждения заменяют постоянным магнитом, что позволяет избавиться от контактных колец и щеток (см. рис. 12.5, б).

12.3. Синхронные машины с постоянными магнитами

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 машин имеет обычную конструкцию с двух- или трехфазной обмоткой.

Эти машины применяют чаще всего в качестве двигателей небольшой мощности. Синхронные генераторы с постоянными магнитами применяют реже, главным образом в качестве ав-

тономно работающих генераторов повышенной частоты, малой и средней мощности.

Синхронные магнитоэлектрические двигатели. Данные 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 2, закрепляют на наружной поверхности явно выраженных полюсов постоянного магнита 3. В цилиндре 2 делают межполюсные прорезы, предотвращающие замыкание потока постоянного магнита в этом цилиндре (рис. 12.3, а).

При аксиальном расположении магнитов конструкция ротора аналогична конструкции ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя. Но к торцам этого ротора прижаты кольцевые постоянные магниты (рис. 12.3, б).

Конструкции с аксиальным расположением магнита применяют в двигателях малого диаметра мощностью до 100 Вт, а конструкции с радиальным расположением магнитов — 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 синхронные двигатели включают в сеть в возбужденном состоянии. При этом поле постоянного магнита в процессе разгона ротора наводит в обмотке статора ЭДС $E_{\text{ин}}$, которая создает в обмотке статора ток, взаимодействующий с полем постоянных магнитов и создающий *тормозной* момент $M_{\text{т}}$, направленный встречно вращению ротора.

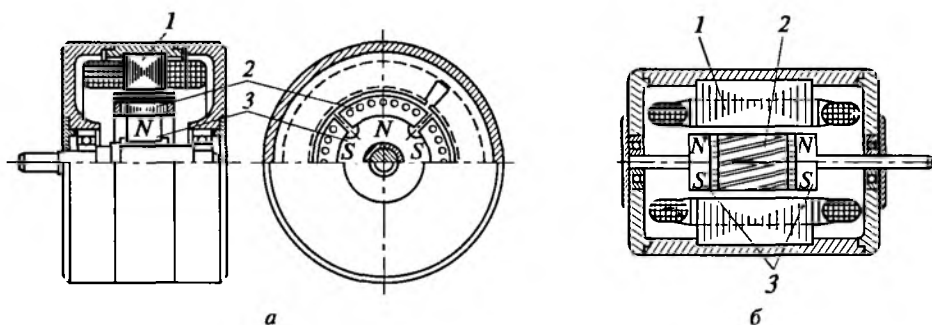


Рис. 12.3. Магнитоэлектрические синхронные двигатели с радиальным (а) и аксиальным (б) расположением постоянных магнитов:

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

Таким образом, при разгоне двигателя с постоянными магнитами на его ротор действуют два асинхронных момента (рис. 12.4): вращающий M_a (от тока I_1 , поступающего в обмотку статора из сети) и тормозной M_T (от тока I_{1n} , наведенного в обмотке статора полем постоянного магнита). Однако зависимость этих моментов от частоты вращения ротора (скольжения) различна: максимум вращающего момента M_a соответствует значительной частоте (небольшому скольжению), а максимум тормозного момента M_T —

малой частоте вращения (большому скольжению).

Разгон ротора происходит под действием результирующего момента

$$M_{\text{рез}} = M_a + M_T,$$

который имеет значительный «провал» в зоне малых частот вращения.

Из приведенных на рис. 12.4 графиков видно, что влияние момента M_T на пусковые свойства двигателя, в частности на момент входа в синхронизм $M_{\text{вх}}$, значительно. Со снижением намагниченности постоянного магнита «провал» результирующего момента уменьшается, т.е. пуск двигателя получается более надежным.

Электромагнитные процессы в магнитоэлектрических синхронных двигателях в принципе аналогичны процессам в синхронных двигателях с электромагнитным возбуждением. Однако необходимо иметь в виду, что постоянные магниты в магнитоэлектрических машинах подвержены размагничиванию действием магнитного потока реакции якоря. Пусковая обмотка несколько ослабляет это размагничивание, так как оказывает на постоянные магниты экранирующее действие.

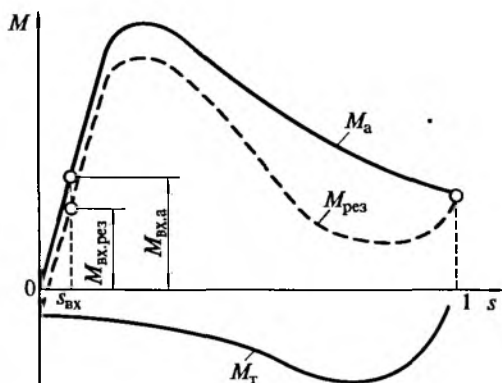


Рис. 12.4. Графики асинхронных моментов магнитоэлектрического синхронного двигателя

Таблица 12.1. Технические данные синхронных двигателей с постоянными магнитами серии ДС

Типоразмер	Номинальные данные			$U_{ном}$, В	Примечание
	Мощность, Вт		$n_{ном}$, об/мин		
	полезная $P_{ном}$	потребляемая $P_{ном}$			
ДС-22-1500/750	16/10,00	48,0	1500/750	380	Трехфазный двухскоростной
ДС-10-1500М	10,00	28,0	1500	220	Конденсаторный
ДС-12-3000	0,25	2,5	3000	127	

Достоинства магнитоэлектрических синхронных двигателей — простота схем соединения, обусловленная отсутствием обмотки возбуждения, высокие энергетические показатели (КПД и $\cos\phi$), 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, выполняемых из сплавов, обладающих большой коэрцитивной силой (сплавы: ални, алнико, магнико и др.).

Промышленность изготавливает синхронные двигатели с постоянными магнитами серии ДС для работы от сети частотой 50 Гц (табл. 12.1).

Синхронные магнитоэлектрические генераторы. Ротор такого генератора выполняют при малой мощности в виде «звездочки» (рис. 12.5, а), при средней мощности — с когтеобразными полюсами и цилиндрическим постоянным магнитом (рис. 12.5, б). Ротор с когтеобразными полюсами дает возможность получить генератор с рассеянием полюсов, ограничивающим ударный ток при внезапном коротком замыкании генератора. Этот ток представляет большую опасность для постоянного магнита своим сильным размагничивающим действием.

Помимо недостатков, отмеченных при рассмотрении магнитоэлектрических синхронных двигателей, генераторы с постоянными магнитами имеют еще один недостаток, обусловленный отсутствием обмотки возбуждения, от чего регулировка напряжения в магнитоэлектрических генераторах практически невозможна, так как свя-

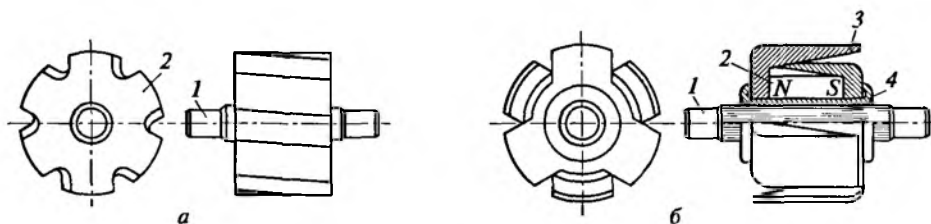


Рис. 12.5. Роторы магнитоэлектрических синхронных генераторов:

1 — вал; 2 — постоянный магнит; 3 — полюс; 4 — немагнитная втулка

зана с усложнением конструкции генератора. Это затрудняет стабилизацию напряжения генератора при изменениях нагрузки.

12.4. Синхронные реактивные двигатели

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

Для выяснения принципа действия СРД рассмотрим реактивный момент явнополюсной синхронной машины (см. 11.2):

$$M_p = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (12.1)$$

Непременное условие создания реактивного момента M_p — явнополюсная конструкция ротора, так как только в этом случае синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям неодинаковы $x_q < x_d$.

Максимальное значение реактивного момента $M_{p \max}$ наступает при значении угла нагрузки $\theta = 45^\circ$. Поэтому зависимость реактивного момента M_p от угла θ определяется выражением

$$M_p = M_{p \max} \sin \theta.$$

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 мо-

мента $M_{\text{осн}} = 0$ и электромагнитный момент СРД определяется лишь реактивной составляющей ($M = M_p$). В связи с этим 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 рис. 12.6, а показана традиционная конструкция ротора СРД, отличающаяся от ротора асинхронного двигателя лишь наличием впадин, обеспечивающих ротору явнополюсную конструкцию. Чем больше эти впадины, тем больше отношение x_d/x_q , а следовательно, больше реактивный момент M_p . Однако с увеличением впадин растет средняя величина воздушного зазора, что ведет к повышению намагничивающего тока статора, а следовательно, к снижению и без того невысоких энергетических показателей двигателя — коэффициента мощности и КПД. Кроме того, с увеличением

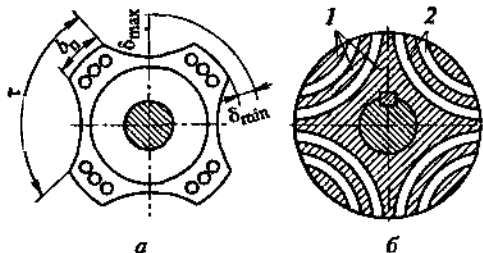


Рис. 12.6. Конструкция роторов синхронного реактивного двигателя

впадин сокращаются размеры пусковой клетки, что ведет к уменьшению асинхронного момента, т.е. к уменьшению пускового момента и момента входа в синхронизм.

Наилучшие результаты дает следующее соотношение размеров ротора:

$$b_{\text{п}}/\tau = 0,5 - 0,6$$

и

$$\delta_{\text{max}}/\delta_{\text{min}} = 10 - 12.$$

В этом случае удастся добиться отношения $x_d/x_q \approx 2$.

Более совершенна секционированная конструкция ротора СРД, представляющая собой цилиндр, в котором стальные полосы 2 залиты алюминием 1 (рис. 12.6, б). Такая конструкция ротора позволяет получить отношение $x_d/x_q \approx 4 - 5$. За счет этого существенно возрастает момент $M_{\text{рmax}}$ при сохранении намагничивающего тока на допустимом уровне.

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.

12.5. Гистерезисные двигатели

Работа гистерезисного двигателя основана на действии *гистерезисного момента*. На рис. 12.7, а показаны два полюса внешнего магнитного поля (условное изображение магнитного поля статора). Между ними 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 вслед-

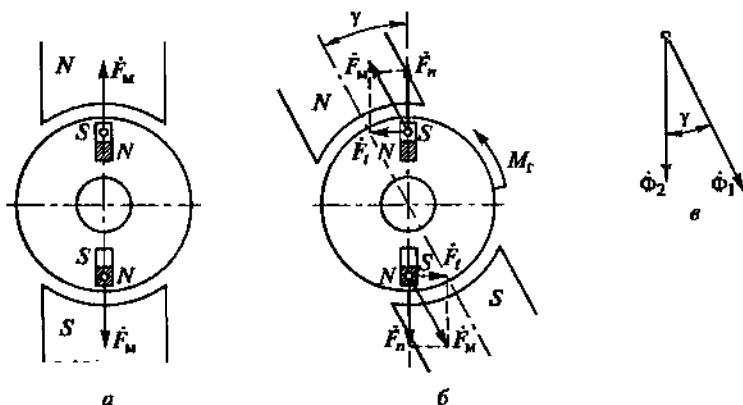


Рис. 12.7. К понятию о гистерезисном моменте

ствие явления *магнитного запаздывания (гистерезиса)* активная часть ротора будет перемагничиваться с некоторым отставанием во времени относительно изменения направления внешнего вращающегося магнитного поля. В результате между осями поля ротора и внешнего поля появится угол γ . Силы F_m , действующие на ротор, также изменят свое направление на угол γ , а тангенциальные составляющие этих сил F_t создадут гистерезисный момент M_r (рис. 12.7, б).

Явление магнитного запаздывания заключается в том, что частицы ферромагнитного материала (помещенного во внешнее магнитное поле), представляющие собой элементарные магниты, стремятся ориентироваться в соответствии с направлением внешнего поля. Если меняется направление внешнего поля, то элементарные частицы также меняют свою ориентацию.

Однако повороту элементарных частиц препятствуют в магнитно-твердых материалах внутренние силы молекулярного трения. Для изменения направления этих частиц необходима определенная МДС, вследствие чего перемагничивание ротора несколько отстает от изменения направления внешнего поля. Это отставание (магнитное запаздывание) характеризуется углом *гистерезисного сдвига* γ между вектором магнитного потока ротора Φ_2 и вектором магнитного потока обмотки статора Φ_1 (рис. 12.7, в). Этот угол зависит исключительно от магнитных свойств материала ротора.

На преодоление сил молекулярного трения расходуется часть подводимой к двигателю мощности, которая составляет *потери на гистерезис*. Величина этих потерь зависит от частоты перемагничивания ротора $f_2 = f_1 s$, а следовательно, от скольжения:

$$P_r = s P_{r.k},$$

где $P_{r.k}$ — потери на гистерезис при неподвижном роторе (при $s = 1$), т.е. в режиме короткого замыкания.

Так как электромагнитная мощность, передаваемая ротору, равна потерям в роторе, деленным на скольжение (см. 4.2),

$$P_{эм} = \frac{P_r}{s} = P_{r.k},$$

а вращающий момент равен электромагнитной мощности, деленной на синхронную угловую скорость,

$$M_r = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{P_{r.k}}{\omega_1}, \quad (12.2)$$

то, очевидно, величина гистерезисного момента не зависит от частоты вращения ротора (скольжения). График $M_r = f(s)$ представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс (рис. 12.8).

Угол гистерезисного сдвига γ зависит от ширины петли гистерезиса: чем шире петля гистерезиса магнитного материала, тем больше угол γ гистерезисного сдвига. На рис. 12.9, а представлены две петли гистерезиса: обычной стали 2 и сплава викаллой 1.

Применение обычной стали для изготовления ротора не обеспечивает гистерезисного момента достаточной

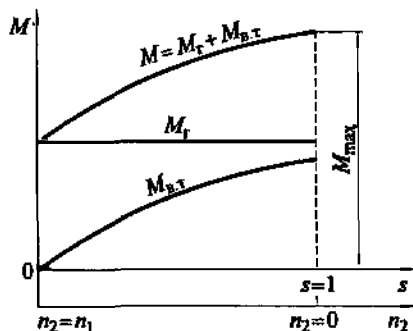


Рис. 12.8. Механические характеристики гистерезисного двигателя

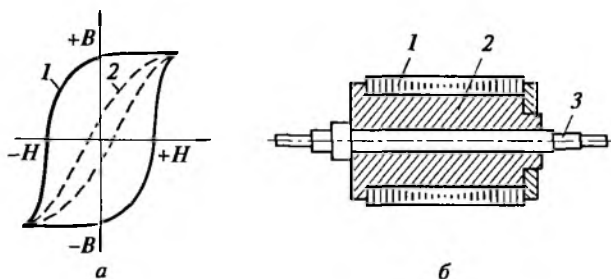


Рис. 12.9. Петли гистерезиса электротехнической стали и сплава викаллой (а) и устройство сборного ротора гистерезисного двигателя (б)

величины. Только магнитно-твердые материалы, например такие, как викаллой, дают возможность получить большой гистерезисный момент.

Роторы гистерезисных двигателей обычно делают сборными. Магнитно-твердая часть выполняется в виде шихтованного или массивного кольца 1, размещенного на втулке 2 (рис. 12.9, б). Последняя жестко посажена на вал 3. В машинах с нешихтованным (массивным) ротором вращающееся поле статора наводит в роторе вихревые токи. В результате взаимодействия этих токов с полем статора на роторе гистерезисного двигателя возникает электромагнитный момент от вихревых токов $M_{в.т.}$, значение которого пропорционально скольжению:

$$M_{в.т.} = \frac{sP_{в.т.к.}}{\omega_1}, \quad (12.3)$$

где $P_{в.т.к.}$ — потери на вихревые токи в роторе при $s = 1$, т.е. в режиме корот-

кого замыкания; ω_1 — угловая синхронная скорость вращения, рад/с.

Наибольшего значения момент $M_{в.т.}$ достигает при неподвижном роторе ($s = 1$), т.е. в момент пуска гистерезисного двигателя. Затем, по мере возрастания частоты вращения (уменьшении скольжения), момент $M_{в.т.}$ убывает (см. рис. 12.8), при синхронной частоте он становится равным нулю. Таким образом, электромагнитный вращающий момент гистерезисного двигателя создается совместным действием моментов от вихревых токов $M_{в.т.}$ и гистерезисного $M_{г.}$:

$$M = M_{в.т.} + M_{г.} = \frac{sP_{в.т.к.}}{\omega_1} + \frac{P_{г.к.}}{\omega_1}. \quad (12.4)$$

Гистерезисный двигатель может работать с синхронной и асинхронной частотами вращения. Однако работа двигателя в асинхронном режиме неэкономична, так как связана со значительными потерями на перемагни-

Таблица 12.2. Технические данные гистерезисных двигателей

Типоразмер	Число фаз	Напряжение питания, В	Частота тока, Гц	Частота вращения, об/мин	Момент номинальный, Н·м
ЭСГ2	3	220	500	15 000	0,016
ДСГ-1*	1	127	50	1500/3000	0,030
ДСГ-2*	1	127	50	1500/3000	0,100

* Двухскоростные двигатели.

чивание 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 ($I_{\text{п}}/I_{\text{ном}} = 1,3—1,4$).

Недостатки гистерезисных двигателей — низкий коэффициент мощности ($\cos \varphi_1 = 0,2—0,5$) и высокая стоимость из-за повышенной стоимости магнитно-твердых материалов и сложности их обработки.

Гистерезисные двигатели обычно изготавливают небольшой мощности для привода механизмов и устройств, требующих стабильной частоты вращения, например для привода блока головок магнитофонов (табл. 12.2).

12.6. Волновые двигатели

Волновой двигатель представляет собой конструктивное объединение механической волновой передачи и синхронного двигателя. Статор волнового двигателя с трех- или двухфазной обмоткой создает вращающееся симметричное магнитное поле, вызы-

вающее механические деформации гибкого элемента. Волновая передача обеспечивает получение значительного коэффициента редукции (до 100 и более) при небольших размерах и массе.

Основные элементы волновой передачи — наружный (неподвижный) цилиндр 4 с зубчатой внутренней поверхностью 3 (рис. 12.10, а) и числом зубцов Z_1 , внутри которого расположен гибкий тонкостенный цилиндр 1 с зубчатой наружной поверхностью 2, имеющей число зубцов $Z_2 < Z_1$.

Если внутренний гибкий цилиндр деформировать в радиальном направлении по оси $I—I'$ (рис. 12.10, б) так, чтобы зубчатые поверхности наружного и внутреннего цилиндров пришли в зацепление, а затем вращать ось деформации $I—I'$ 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 $I—I'$ с частотой (об/мин),

$$n_2 = n_1 k'_p,$$

где $k'_p = (Z_1 - Z_2)/Z_1$ — коэффициент редукции скорости волнового двигателя.

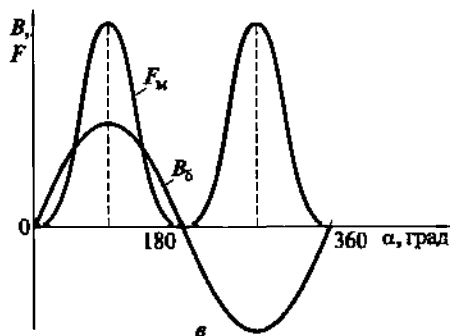
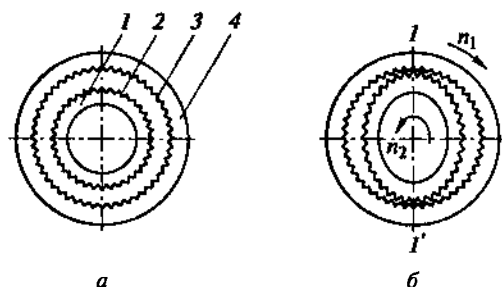


Рис. 12.10. К принципу действия волнового двигателя

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

Рассмотрим упрощенную конструкцию волнового двигателя (рис. 12.11). 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 полого тонкостенного стакана 6, 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 стакана ротора 6 расположены подвижные относительно друг друга сектора 7 из ферромагнитного материала. Под действием сил магнитного притяжения секторы могут перемещаться в радиальном направлении, вызывая 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, вызывая деформацию гибких колец 8 и 5, как это показано на рис. 12.10, б. При этом ротор двигателя вращается в направлении, противоположном вращению поля статора, с частотой n_2 .

Рассмотренный волновой двигатель является синхронным двигателем реактивного типа.

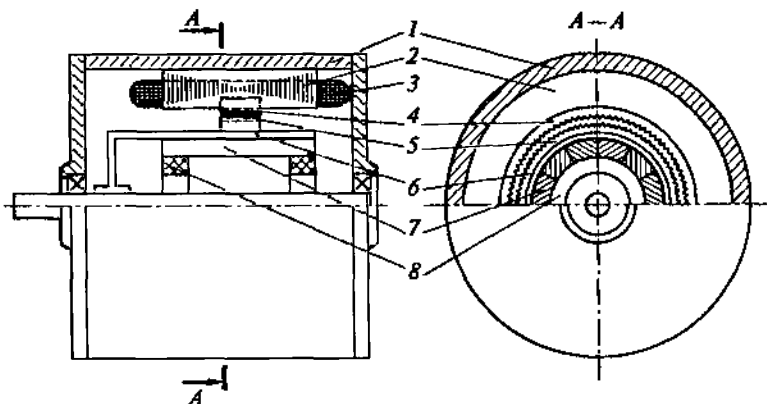


Рис. 12.11. Устройство волнового двигателя:

1 — корпус; 2 — сердечник статора; 3 — обмотка статора; 4 — неподвижное кольцо волновой передачи; 5 — гибкое внутреннее кольцо волновой передачи; 6 — полый стакан ротора; 7 — ферромагнитные сектора; 8 — эластичное кольцо

Если обмотка статора двухполюсная и магнитная индукция вращающегося поля B_δ распределена по синусоидальному закону (см. рис. 12.10, в), то сила магнитного притяжения ферромагнитных секторов 7 к сердечнику статора 2 (см. рис. 12.11) распределяется по периметру ротора в соответствии с графиком F_m , показанным на рис. 12.10, в. Максимальные значения этой силы действуют на диаметрально расположенные участки ротора, вызывая деформацию гибкого кольца.

Волновой двигатель может работать с многополюсной обмоткой статора. При этом у элементов волновой передачи число волн деформации равно

числу полюсов вращающегося поля статора $2p$. Ротор волнового двигателя в процессе работы остается сбалансированным, так как волны деформации располагаются симметрично относительно оси вращения ротора.

Перспективно использование волновых двигателей для привода устройств автоматики из-за их малоинерционности и высокой точности заданных перемещений.

В заключение отметим, что применение волновых двигателей ограничивается некоторой сложностью их конструкции, обусловленной трудностью изготовления гибкого элемента ротора.

РАЗДЕЛ IV

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГЛАВА 13

УСТРОЙСТВО И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ГЕНЕРАТОРОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

13.1. Устройство коллекторных машин постоянного тока

Характерным признаком коллекторных электрических машин является наличие у них коллектора и контактных щеток — механического преобразователя переменного тока в постоянный ток, 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.

Электрические машины постоянного тока используют как в качестве генераторов, так и двигателей. Наибольшее применение имеют двигатели постоянного тока, диапазон мощности которых достаточно широк: от долей ватта (для привода устройств автоматики) до нескольких тысяч киловатт (для привода прокатных станов, шахтных подъемников и других крупных механизмов).

Двигатели постоянного тока широко используют для привода подъемных устройств в качестве крановых двигателей и привода транспортных

средств, а также в качестве тяговых двигателей.

Основные *достоинства* двигателей постоянного тока по сравнению с бесколлекторными двигателями переменного тока — хорошие пусковые и регулировочные свойства, возможность получения частоты вращения более 3000 об/мин, а *недостатки* — относительно высокая стоимость, некоторая сложность в изготовлении, пониженная надежность. Эти недостатки машин постоянного тока обусловлены наличием в них щеточно-коллекторного узла, который к тому же является источником радиопомех и пожароопасности. Но, несмотря на отмеченные недостатки, двигатели постоянного тока в некоторых случаях пока незаменимы, так как обладают большой перегрузочной способностью, хорошими пусковыми и регулировочными свойствами.

На рис. 13.1 показано устройство коллекторной машины постоянного тока защищенного исполнения IP22 и способом вентиляции IC01. Станина 8 выполнена из стали Ст3, сердечники главных полюсов 25 набраны из штампованных пластин холоднокатаной электротехнической стали марки 3411

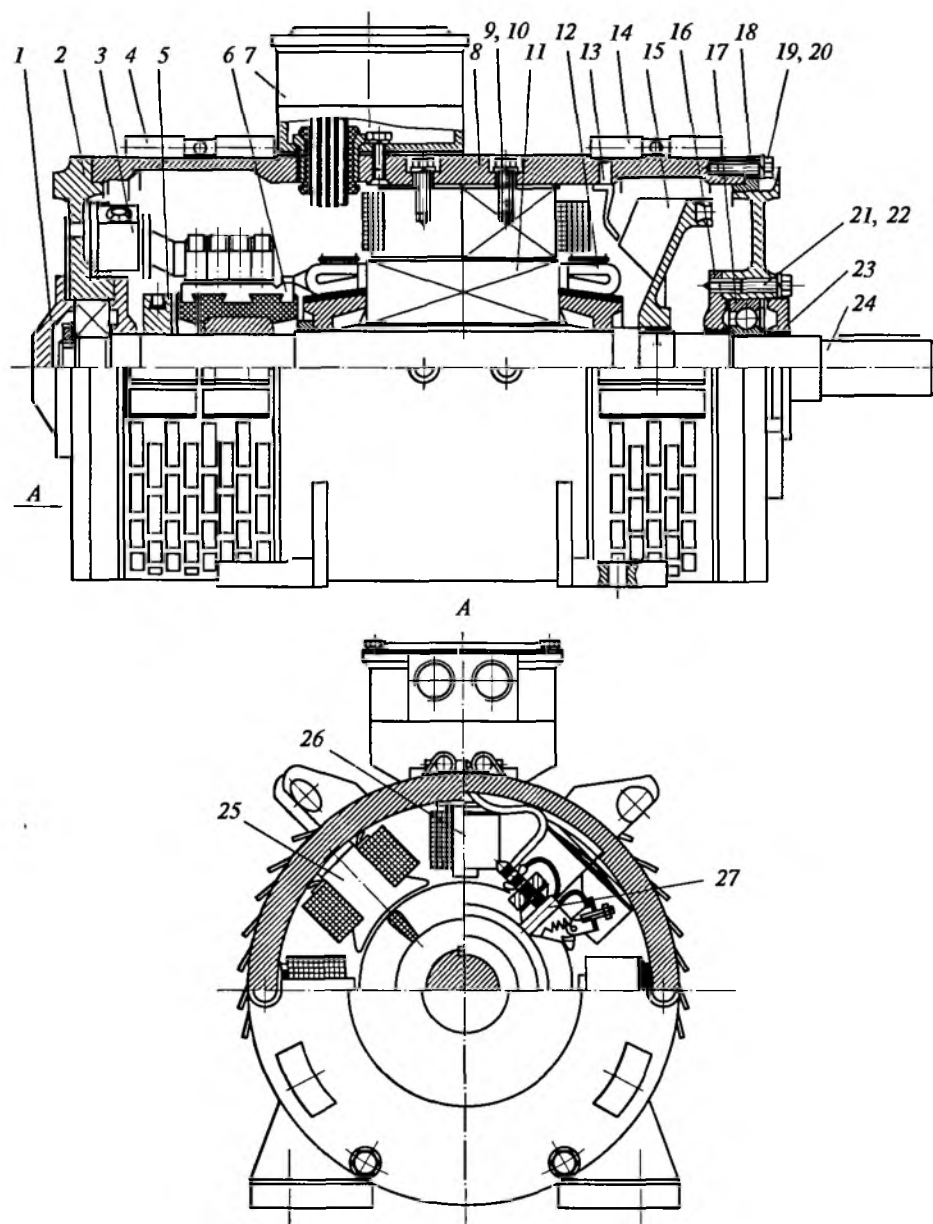


Рис. 13.1. Устройство коллекторной машины постоянного тока:

1 — крышка подшипника наружная; 2 — щит подшипниковый; 3 — траверса; 4 — лента защитная; 5 — балансирующее кольцо; 6 — коллектор; 7 — вводное устройство; 8 — станина; 9 — болт крепления полюса; 10 — шайба; 11 — сердечник якоря; 12 — обмотка якоря; 13 — диффузор; 14 — защитная лента; 15 — вентилятор; 16 — крышка подшипника внутренняя; 17 — шарикоподшипник; 18 — подшипниковый щит; 19 — болт крепления подшипникового щита; 20 — шайба; 21 — болт крепления крышек подшипника; 22 — шайба; 23 — крышка подшипника наружная; 24 — вал; 25 — главный полюс; 26 — добавочный полюс; 27 — щетки

толщиной 1 мм. Полюсные катушки этих полюсов многослойные из обмоточного провода круглого сечения марки ПЭТВ.

Сердечники добавочных полюсов 26 набирают из пластин холоднокатаной стали толщиной 1 мм. В машинах с высотой оси вращения до 132 мм включительно сердечники добавочных полюсов делают монолитными (не шихтованными) из полосовой стали. Полюсные катушки этих полюсов обычно состоят из провода прямоугольного сечения марки ПСД, намотанного на ребро.

Сердечник якоря 11 набирают из штампованных пластин холоднокатаной электротехнической стали марок 2013, 2211, 2312 толщиной 0,5 мм. Эти пластины предварительно покрывают изолирующим лаком, а затем набирают на валу 24, спрессовывают и сжимают двумя шайбами, одна из которых упирается в уступ вала. Указанные шайбы выполняют также функцию обмоткодержателей для лобовых частей обмотки якоря 12.

Кроме того, на валу машины расположены коллектор 6 и вентилятор 15. В рассматриваемой машине применена аксиальная вентиляция: воздух поступает в отверстия подшипниково-

го щита со стороны коллектора, проходит через внутреннюю полость машины и выбрасывается наружу через окна в подшипниковом щите со стороны выступающего конца вала.

К подшипниковому щиту со стороны коллектора прикреплен траверса 3 со щеткодержателями, в которые вставлены щетки. На панель вводной коробки 7 выведены концы обмоток якоря, возбуждения и добавочных полюсов.

Наиболее сложным узлом машины постоянного тока является коллектор 5, который состоит из набора коллекторных пластин трапецеидального сечения, разделенных миканитовыми прокладками.

Пластины из меди и миканита удерживаются в сжатом состоянии за нижнюю часть, имеющую форму «ласточкина хвоста», посредством стальных конусных колец 1 (рис. 13.2). Выступающая вверх часть коллекторных пластин 6, называемая «петушок», служит для присоединения секций обмотки якоря к пластинам коллектора.

Коллекторные пластины изолируют от конусных колец миканитовыми манжетами 3, а от втулки 5 — миканитовым изолирующим цилиндром 4.

В машинах небольшой мощности применяют коллектор более простой

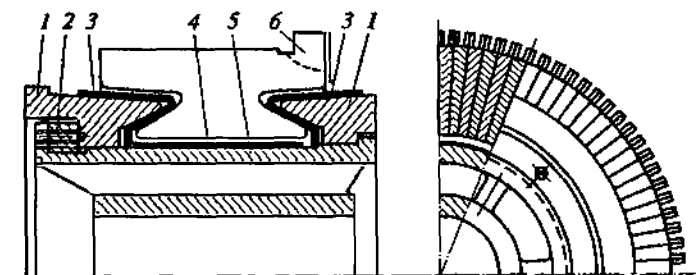


Рис. 13.2. Коллектор с конусными кольцами (шайбами):

1 — конусные кольца; 2 — кольцевая гайка; 3 — миканитовые манжеты; 4 — миканитовый изолирующий цилиндр; 5 — втулка; 6 — коллекторные пластины

конструкции, называемый коллектором на пластмассе. В этом коллекторе пластины 1 и миканитовые прокладки 2 запрессовываются в пластмассу 2 (рис. 13.3). Для придания коллектору большей прочности в него вводят армирующие кольца 3.

Поверхность медных пластин коллектора в процессе работы машины постепенно истирается щетками. Чтобы при этом миканитовые прокладки не выступали над рабочей поверхностью медных пластин, что могло бы привести к нарушению электрического контакта коллектора со щетками, приходится периодически выполнять «*продоразивание*» коллектора. Эта операция состоит в том, что между рабочими поверхностями коллекторных пластин фрезеруют пазы (дорожки) на глубину до 1,5 мм (рис. 13.4).

Щеточную траверзу обычно крепят к подшипниковому щиту, и только в машинах большой мощности — к станине. К траверзе через изоляционные прокладки крепят щеточные пальцы, число которых равно числу основных полюсов. На каждый палец устанавли-

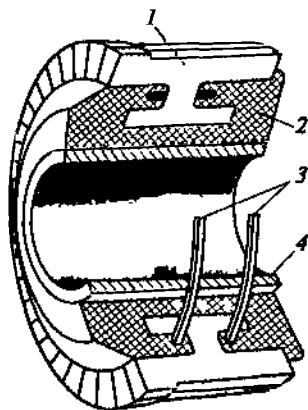


Рис. 13.3. Коллектор на пластмассе:

1 — медные пластины; 2 — пластмасса; 3 — армирующие кольца; 4 — стальная втулка

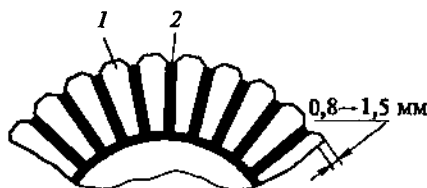


Рис. 13.4. К понятию о «продоразивании» коллектора:

1 — медные пластины; 2 — миканитовые прокладки

вают комплект щеткодержателей. Одним из условий бесперебойной работы машины постоянного тока является надежный контакт между щеткой и коллектором.

Давление на щетку должно быть отрегулировано, так как чрезмерный нажим щетки на коллектор вызывает преждевременный износ щетки и перегрев коллектора, а недостаточный нажим — искрение на коллекторе.

13.2. Обмотки якорей машин постоянного тока

Элементом обмотки якоря является *секция*, которая своими концами присоединена к двум пластинам коллектора. Секции могут быть одновитковыми и многовитковыми. Пазовые стороны секций расположены в пазах сердечника якоря. Расстояние между пазовыми сторонами секции приблизительно равно полюсному делению

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p},$$

где D_a — диаметр сердечника якоря.

Обычно обмотки якоря выполняют двухслойными. В зависимости от порядка присоединения секций к пластинам коллектора обмотки разделяют на волновые и петлевые, простые, сложные и комбинированные.

В *простой волновой обмотке* концы каждой секции присоединены к пластинам коллектора, находящимся на расстоянии, называемом *шагом обмотки* по коллектору,

$$y_k = \frac{K \pm 1}{p},$$

где K — число коллекторных пластин в коллекторе.

На рис. 13.5 показана схема простой волновой обмотки якоря. Секции обмотки образуют две параллельные ветви ($2a = 2$). Число параллельных ветвей в обмотке и число секций в каждой ветви определяют ток I_a и ЭДС E_a обмотки якоря:

$$E_a = \frac{S}{2a} e_c;$$

$$I_a = i_c \cdot 2a,$$

где S — количество секций в обмотке якоря; e_c — ЭДС одной секции; i_c — допустимое значение тока в секции.

В машинах постоянного тока, рассчитанных на большие токи, применяют *сложную волновую обмотку*, со-

стоящую из двух простых волновых обмоток, соединяемых щетками параллельно (рис. 13.6). Такая обмотка содержит четыре параллельные ветви, следовательно, ток в ней может быть увеличен в два раза, а ЭДС при этом остается прежней.

В машинах постоянного тока низкого напряжения (значительного тока) необходима обмотка якоря с большим числом параллельных ветвей. Таким свойством обладают петлевые обмотки. В *простой петлевой обмотке* якоря (рис. 13.7) каждая секция присоединена к двум рядом лежащим коллекторным пластинам, а число параллельных ветвей равно числу полюсов, т.е. $2a = 2p$.

При необходимости получить еще большее число параллельных ветвей применяют *сложную петлевую обмотку якоря* (рис. 13.8). Такая обмотка содержит две простые петлевые обмотки ($m = 2$), поэтому у нее число параллельных ветвей удвоено, т.е. $2a = 2 \cdot 2p = 4p$. Такие обмотки необходимы в машинах значительной мощнос-

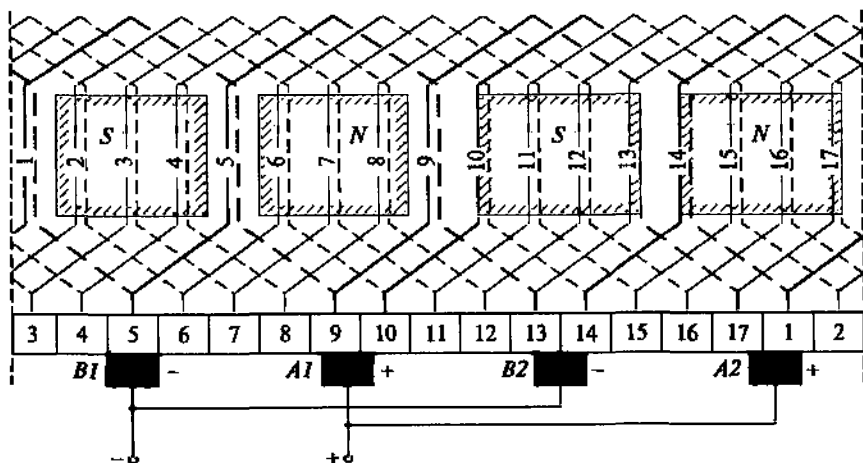


Рис. 13.5. Схема простой волновой обмотки якоря:

$$2p = 4; 2a = 2; S = K = 17; y_1 = 4; y_k = 8$$

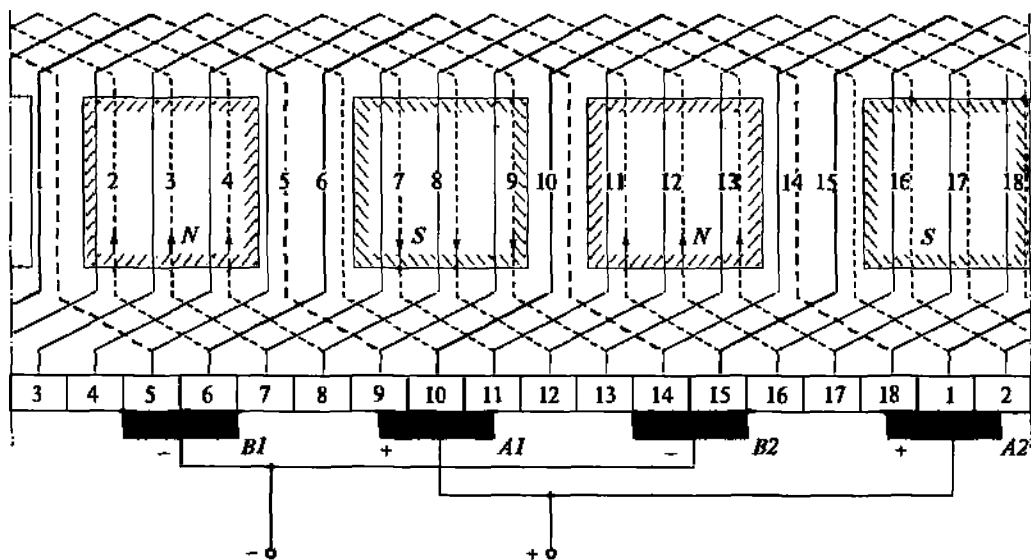


Рис. 13.6. Сложная волновая обмотка якоря:

$$2p = 4; m = 2; 2a = 4; S = K = 18; y_1 = 4; y_k = y = 8$$

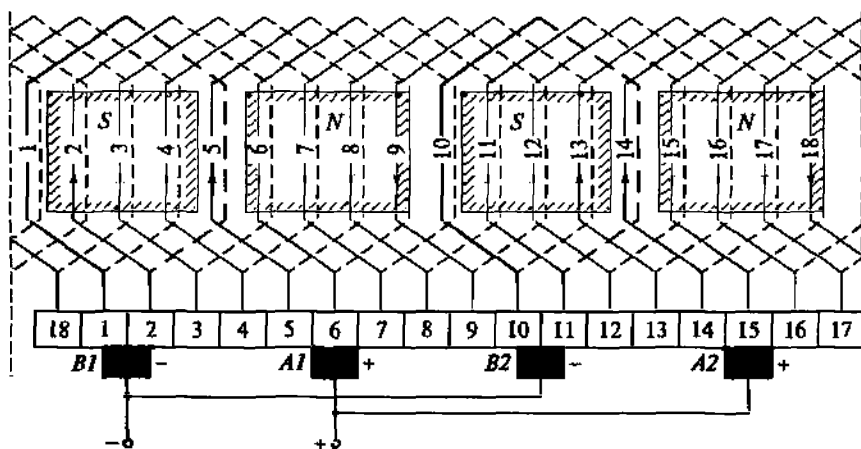


Рис. 13.7. Простая петлевая обмотка якоря:

$$2p = 4; 2a = 2p = 4; S = K = 18; y_1 = 4; y_k = y = 1$$

ти при низком напряжении сети: 12; 24; 48 В.

Для того чтобы распределение токов в параллельных ветвях обмотки якоря было одинаковым, необходимо, чтобы электрическое сопротивление

этих ветвей не отличалось друг от друга и чтобы ЭДС, наводимые в секциях, составляющих каждую параллельную ветвь, были одинаковыми. При несоблюдении этих условий между параллельными ветвями появляются *урав-*

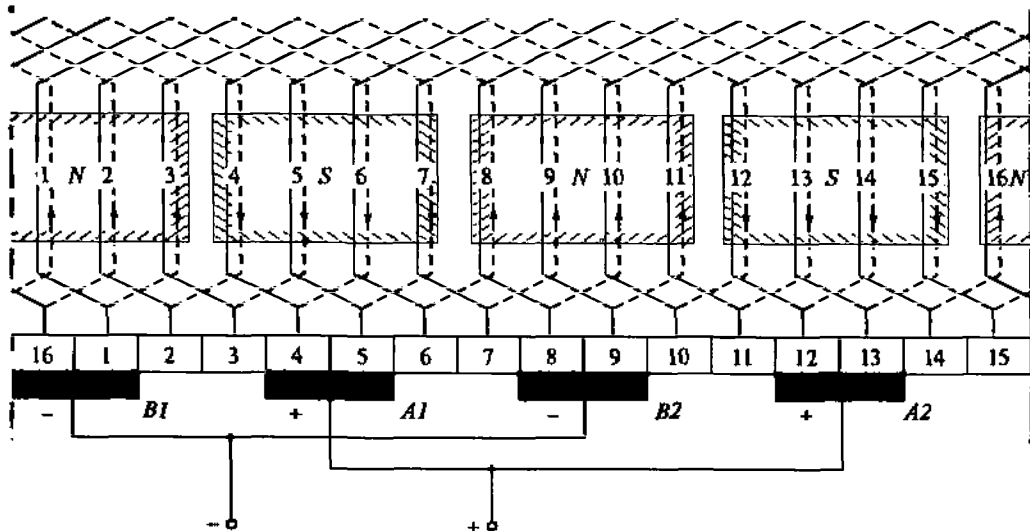


Рис. 13.8. Сложная петлевая обмотка якоря:

$$2p = 4; m = 2; 2a = m; 2p = 8; S = K = 16; y_1 = 4; y_k = y = 2$$

нительные токи, нарушающие работу щеточно-коллекторного узла.

Исключение составляет простая волновая обмотка, секции которой равномерно распределены под всеми полюсами машины, поэтому магнитная несимметрия машины не вызывает появления в этой обмотке уравнивающих токов. Что же касается простой петлевой и всех видов сложных обмоток якоря, то в них всегда имеются причины к появлению уравнивающих токов. Это приводит к необходимости применения в указанных обмотках так называемых *уравнивающих соединений*, по которым замыкаются уравнивающие токи, разгружая щеточно-коллекторный узел от перегрузки. Уравнивающие соединения усложняют изготовление обмотки якоря и ведут к дополнительному расходу обмоточной меди.

В электрических машинах со значительным током в обмотке якоря про-

стые волновые обмотки неприменимы, так как в этих обмотках число параллельных ветвей не может быть более двух. Чтобы увеличить число параллельных ветвей и избежать нежелательного применения уравнивающих соединений в машинах с большой токовой нагрузкой, используют *комбинированную обмотку*. Такая обмотка состоит из секций волновой и петлевой обмоток, а число параллельных ветвей в ней равно сумме параллельных ветвей петлевой и волновой обмоток. Необходимо, чтобы число параллельных ветвей волновой обмотки было равно числу ветвей петлевой обмотки. Поэтому в четырехполюсной машине комбинированную обмотку выполняют из простой петлевой ($2a = 2p = 4$) и сложной волновой ($m = 2$) обмоток. В этом случае число параллельных ветвей комбинированной обмотки равно $2a_{\text{комб}} = 4 + 4 = 8$. В такой обмотке ветви одной из составляющих

обмоток служат уравнительными соединениями для другой. В итоге комбинированная обмотка с таким числом параллельных ветвей оказывается проще сложной петлевой обмотки.

13.3. Причины искрения на коллекторе машины постоянного тока и способы улучшения коммутации

При работе машины постоянного тока щетки и коллектор образуют скользящий контакт. Площадь контакта щетки выбирают по значению рабочего тока машины, приходящегося на одну щетку, в соответствии с допустимой плотностью тока для выбранной марки щеток. Если по какой-либо причине щетка прилегает к коллектору не всей поверхностью, то возникают чрезмерные местные плотности тока, приводящие к искрению на коллекторе.

Причины, вызывающие искрение на коллекторе, разделяют на механические, потенциальные и коммутационные.

Механические причины искрения — слабое прижатие щеток к коллектору, биение коллектора, его эллиптичность или негладкая поверхность, загрязнение поверхности коллектора, выступание миканитовой изоляции над медными пластинами, неплотное закрепление траверсы, пальцев или щеткодержателей, а также другие причины, вызывающие нарушение электрического контакта между щеткой и коллектором.

Потенциальные причины искрения возникают, если напряжение между смежными коллекторными пластинами превышает допустимое значение (не более 16 В для машин без компен-

сационной обмотки и 20 В для машин с компенсационной обмоткой). В этом случае искрение наиболее опасно, так как оно обычно сопровождается появлением на коллекторе электрических дуг.

Коммутационные причины искрения возникают при физических процессах, происходящих в машине в связи с переходом секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую.

Иногда искрение вызывается целым комплексом причин. Выяснение причин искрения следует начинать с механических причин, так как их можно обнаружить проверкой состояния коллектора и щеточного устройства. Труднее обнаружить и устранить коммутационные причины искрения.

При выпуске готовой машины в ней настраивают темную коммутацию, исключаящую какое-либо искрение. Однако в процессе эксплуатации машины, по мере износа коллектора и щеток, возможно появление искрения. В некоторых случаях оно может быть значительным и опасным, тогда машину необходимо остановить для выяснения и устранения причин искрения. Однако небольшое искрение в машинах общего назначения обычно допустимо.

Согласно ГОСТ 183—74, искрение на коллекторе оценивается степенью искрения (классом коммутации) под сбегающим краем щетки (табл. 13.1).

Небольшие искры в виде отдельных огневых точек практически безопасны для коллектора, поэтому эксплуатация машины при первых трех степенях коммутации допустима. При дальнейшем усилении искрения под сбегающими краями щеток возникает опасность появления электрических дуг, перекрывающих пространство между щетками противоположной полярности, что в свою очередь мо-

Таблица 13.1. Степень искрения (класс коммутации) электрических машин постоянного тока

Степень искрения (класс коммутации)	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения (темная коммутация)	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
1 1/4	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки	То же
1 1/2	Слабое искрение под большей частью щетки	Появление следов почернения на коллекторе, легко устранимых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки	Появление следов почернения на коллекторе, не устранимых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
3	Значительное искрение под всем краем щетки с наличием вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устранимое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и разрушение щеток

Примечание. При номинальном режиме работы машины искрение не должно превышать степень 1 1/2.

жет привести к возникновению мощной электрической дуги в виде огневой ленты между щетками или даже к появлению кругового огня — явления очень опасного для машины.

Большое практическое значение при эксплуатации машин постоянного тока имеют вопросы *улучшения коммутации*. Основной причиной неудовлетворительной коммутации является возникновение в коммутирующих секциях добавочного тока коммутации

$$i_d = \frac{e_p + e_{вр}}{r_{щ}},$$

где e_p — реактивная ЭДС, индуцируемая в коммутирующих секциях за счет взаимной индуктивности секций и явления самоиндукции секций; $e_{вр}$ — ЭДС вращения, наводимая в коммутирующих секциях магнитной индукцией в зоне коммутации B_k , создаваемой за счет *реакции якоря*; $r_{щ}$ — электрическое сопротивление щетки добавочному току коммутации.

Из этого следует, что для улучшения коммутации необходимо уменьшить величину добавочного тока коммутации. Этого можно достигнуть несколькими способами.

1. Выбор щеток. С точки зрения обеспечения удовлетворительной коммутации целесообразно применение щеток с большим падением напряжения в переходном контакте и собственно щетке, т. е. щетки с большим сопротивлением $r_{щ}$, что привело бы к уменьшению тока i_d . Однако допустимая плотность тока в щеточном контакте таких щеток невелика, поэтому их применение в машинах со значительным током якоря ведет к необходимости увеличения площади щеточного контакта, что требует увеличения площади коллектора за счет его длины. В связи с этим щетки с большим $r_{щ}$ используют преимущественно в машинах с относительно высоким напряжением, а следовательно, с небольшим током якоря.

Выбирают щетки в соответствии с рекомендациями, выработанными на основании опыта эксплуатации электрических машин (см. табл. 2.14). Наибольшее применение в машинах постоянного тока напряжением 110—440 В нашли электрографитированные щетки ЭГ.

Увеличению переходного сопротивления щеточного контакта, а следовательно, улучшению коммутации способствует политура коллектора — тонкая оксидная пленка на поверхности коллектора, обладающая повышенным электрическим сопротивлением.

2. Уменьшение реактивной ЭДС в коммутирующих секциях. Снижению реактивной ЭДС, индуцируемой в коммутирующих секциях, способствует уменьшение коэффициентов взаимной индуктивности M и самоиндукции L_c . Понижение коэффициента M достигается применением обмоток якоря с укороченным шагом ($y_1 < \tau$) и щеток шириной не более чем в два-три коллекторных деления. Уменьше-

ние коэффициента самоиндукции L_c достигается сокращением числа витков в секциях обмотки якоря ($L_c \equiv w_c^2$).

3. Добавочные полюса. Назначение добавочных полюсов — создание магнитного поля в зоне коммутации с магнитной индукцией $B_{д.п}$ такого значения и направления, чтобы «подавить» магнитную индукцию от реакции якоря $B_{р.я}$ и сверх этого создать в зоне коммутации магнитную индукцию B_k . Индукция B_k должна быть достаточной для индуцирования в коммутирующей секции ЭДС вращения $e_{вр}$, равную по величине и противоположную по направлению реактивной ЭДС e_p , так чтобы суммарная ЭДС в коммутирующей секции оказалась равной нулю:

$$\sum e = \bar{e}_p + \bar{e}_{вр} = 0.$$

Добавочные полюса располагают между главными полюсами по линии геометрической нейтрали, а их обмотку включают последовательно с обмоткой якоря, чем обеспечивается автоматическое поддержание на требуемом уровне значения магнитной индукции в зоне коммутации при изменениях нагрузки машины. Все машины постоянного тока мощностью свыше 1 кВт снабжаются добавочными полюсами, число которых принимают равным числу главных полюсов или же вдвое меньшим. Добавочные полюса обеспечивают удовлетворительную коммутацию в машине только при нагрузках в пределах номинальной. При перегрузке машины происходит насыщение магнитной цепи этих полюсов и коммутация ухудшается.

Однако добавочные полюсы не устраняют полностью нежелательного воздействия реакции якоря на распределение магнитной индукции в зазоре машины постоянного тока. Поэтому

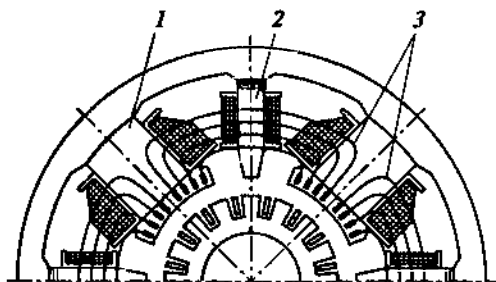


Рис. 13.9. Полюсы и обмотки машины постоянного тока:

1 — главный полюс с обмоткой возбуждения;
2 — добавочный полюс с обмоткой; 3 — компенсационная обмотка

му в мощных быстроходных машинах постоянного тока, работающих в режиме интенсивных нагрузок, применяют компенсационную обмотку. Эту обмотку включают последовательно в цепь якоря и располагают в полюсных наконечниках главных полюсов машины (рис. 13.9). Компенсационная обмотка создает МДС по поперечной оси встречно магнитному потоку якоря и компенсирует его.

4. Смещение щеток с геометрической нейтральной. В машинах мощностью до 1 кВт без добавочных полюсов улучшение коммутации достигается смещением щеток с геометрической нейтральной в направлении вращения якоря у генераторов или встречно направлению вращения якоря у двигателей. Этот способ улучшения коммутации применим лишь в неререверсируемых электрических машинах, работающих с неизменной нагрузкой.

Искрение на коллекторе является интенсивным источником электромагнитных колебаний частотой от 1000 до 3000 Гц. Эти колебания распространяются по сети и вызывают помехи в радиоприемных устройствах. Для устранения помех применяют подавляющие электрические фильтры из про-

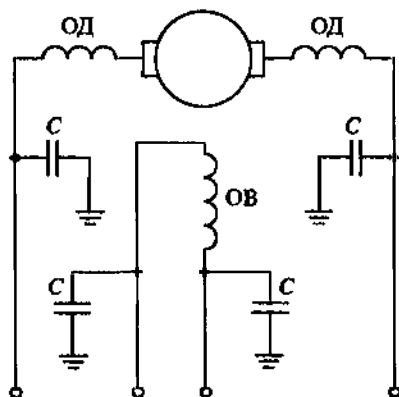


Рис. 13.10. Схема включения помехозащитного фильтра

ходных конденсаторов типа КБП емкостью от 0,1 до 1,0 мкФ (рис. 13.10). У этих конденсаторов одним из зажимов является металлическая оболочка, прикрепляемая к заземленному корпусу машины.

13.4. Генераторы постоянного тока

Основной магнитный поток, возбуждающий машину постоянного тока, создается обмоткой возбуждения. В зависимости от способа включения этой обмотки относительно обмотки якоря машины постоянного тока разделяются на машины независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения (рис. 13.11). Способ возбуждения в значительной степени влияет на свойства машин постоянного тока.

Для генераторов постоянного тока справедливо уравнение напряжений

$$U = E_a - I_a \sum r - \Delta U_{\text{щ}}, \quad (13.1)$$

где E_a — ЭДС обмотки якоря, В,

$$E_a = c_e \Phi n; \quad (13.2)$$

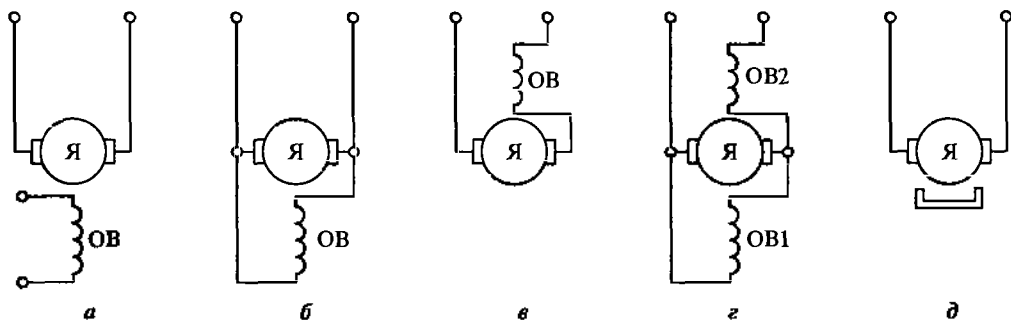


Рис. 13.11. Способы возбуждения машин постоянного тока:

а — независимое; *б* — параллельное; *в* — последовательное; *г* — смешанное; *д* — с постоянным магнитом

$\sum r$ — сумма сопротивлений в цепи обмотки якоря: собственно обмотки якоря, обмотки добавочных полюсов и т. д., Ом; $\Delta U_{\text{щ}}$ — падение напряжения в щеточном контакте на пару щеток, зависящее от марки щеток, примененных в машине (см. табл. 2.14), В; $c_e = pN/(60a)$ — величина, постоянная для данной машины; N — количество пазовых проводников в обмотке якоря; Φ — основной магнитный поток возбуждения, Вб; n — частота вращения якоря машины, об/мин.

С появлением тока I_a в обмотке машины на якоре возникает электромагнитный момент, Н·м,

$$M = c_M \Phi I_a, \quad (13.3)$$

где $c_M = pN/(2\pi a)$ — величина, постоянная для данной машины.

В генераторе электромагнитный момент M направлен встречно вращающему моменту приводного двигателя, поэтому он является тормозящим, в то время как в двигателе этот момент является вращающим, так как приводит якорь двигателя во вращение.

Электрическая мощность на выходе генератора $P_2 = UI_a$ меньше механической мощности двигателя, приводящей якорь генератора во враще-

ние $P_1 = 0,105 Mn$ на величину потерь мощности:

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

откуда КПД генератора

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI_a}{UI_a + \sum P} = \\ &= 1 - \frac{\sum P}{UI_a + \sum P}. \end{aligned} \quad (13.4)$$

При оценке свойств генераторов постоянного тока пользуются понятием номинального изменения напряжения на выходе генератора при сбросе нагрузки:

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100, \quad (13.5)$$

где U_0 — напряжение на выходе генератора в режиме холостого хода, когда $I_a = 0$. Величина $\Delta U_{\text{ном}}$ зависит от способа возбуждения генератора. Например, для генератора независимого возбуждения $\Delta U_{\text{ном}} = 5 - 10\%$; генератора параллельного возбуждения $\Delta U_{\text{ном}} = 15 - 30\%$.

У генератора смешанного возбуждения при согласном включении обмоток возбуждения величина $\Delta U_{\text{ном}}$ зависит от соотношения витков в обмотках возбуждения и может быть рав-

на нулю или даже иметь отрицательное значение: напряжение на выходе такого генератора с повышением нагрузки несколько возрастает, компенсируя падение напряжения в проводах, соединяющих генератор с нагрузкой (потребителем).

13.5. Двигатель постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения

Для двигателей постоянного тока уравнение напряжений имеет вид

$$U = E_a + I_a \sum r + \Delta U_{\text{ш}}, \quad (13.6)$$

или, приняв $\Delta U_{\text{ш}} = 0$,

$$U = E_a + I_a \sum r.$$

Отсюда ток якоря двигателя постоянного тока

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum r}.$$

Электромагнитный момент двигателя постоянного тока, Н·м,

$$M = c_m \Phi I_a = \frac{9,55 P_{\text{эм}}}{n}. \quad (13.7)$$

Момент на валу двигателя, т. е. полезный момент,

$$M_2 = M - M_0 = \frac{9,55 P_2}{n}, \quad (13.8)$$

где M_0 — момент холостого хода; P_2 — полезная мощность двигателя;

$$P_2 = P_1 \eta_{\text{дв}},$$

где $\eta_{\text{дв}}$ — КПД двигателя;

$$\eta_{\text{дв}} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}.$$

Частота вращения якоря двигателя постоянного тока, об/мин,

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e \Phi}. \quad (13.9)$$

Уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения (рис. 13.12) имеет вид

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M (\sum r + R_{\text{доб}})}{c_e c_m \Phi^2} = n_0 - \Delta n. \quad (13.10)$$

Из этого уравнения следует, что механические характеристики двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения прямолнейны и пересекают ось ординат в точке холостого хода n_0 (рис. 13.13, а), при этом изменение частоты вращения двигателя Δn , обусловленное изменением его механической нагрузки, пропорционально сопротивлению цепи якоря $R_a = \sum r + R_{\text{доб}}$. Поэтому наименьшему сопротивлению цепи якоря $R_a = \sum r$, когда $R_{\text{доб}} = 0$, соответствует наименьший перепад частоты вращения Δn_e . При этом механическая характеристика становится жесткой (график 1).

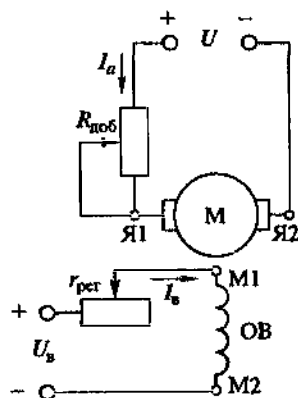


Рис. 13.12. Принципиальная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения

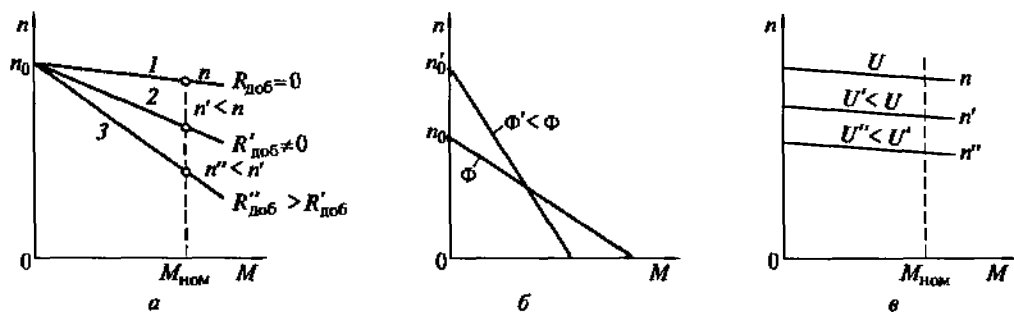


Рис. 13.13. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения:

а — при изменениях сопротивления резистора $R_{доб}$; *б* — при изменениях основного магнитного потока возбуждения Φ ; *в* — при изменениях напряжения U , подводимого к обмотке якоря

Механические характеристики двигателя, полученные при номинальных значениях напряжения на обмотках якоря и возбуждения и при отсутствии добавочных сопротивлений в цепи якоря, называют *естественными* (график 1). Если же хотя бы один из перечисленных параметров двигателя изменен (напряжение на обмотках якоря или возбуждения отличаются от номинальных значений, или же изменено сопротивление в цепи якоря введением $R_{доб}$), то механические характеристики называют *искусственными*.

Искусственные механические характеристики, полученные введением в цепь якоря добавочного сопротивления $R_{доб}$, называют также реостатными (графики 1, 2 и 3).

При оценке регулировочных свойств двигателей постоянного тока наибольшее значение имеют механические характеристики $n = f(M)$. При неизменном моменте нагрузки на валу двигателя с увеличением сопротивления резистора $R_{доб}$ частота вращения уменьшается. Сопротивления резистора $R_{доб}$ для получения искусственной механической характеристики, соответствующей требуемой частоте вращения n

при заданной нагрузке (обычно номинальной) для двигателей независимо (параллельного) возбуждения:

$$R_{доб} = \frac{U}{I_a} \left(1 - \frac{n}{n_0} \right) - \sum r, \quad (13.11)$$

где U — напряжение питания цепи якоря двигателя, В; I_a — ток якоря, соответствующий заданной нагрузке двигателя, А; n — требуемая частота вращения, об/мин; n_0 — частота вращения холостого хода, об/мин.

Частота вращения холостого хода n_0 представляет собой *пограничную* частоту вращения, при превышении которой двигатель переходит в генераторный режим. Эта частота вращения превышает номинальную $n_{ном}$ на столько, на сколько номинальное напряжение $U_{ном}$, подводимое к цепи якоря, превышает ЭДС якоря $E_{аном}$ при номинальной нагрузке двигателя:

$$\frac{n_0}{n_{ном}} = \frac{U_{ном}}{E_{аном}},$$

откуда

$$\begin{aligned} n_0 &= n_{ном} \frac{U_{ном}}{E_{аном}} = \\ &= \frac{n_{ном} U_{ном}}{U_{ном} - I_{аном} \sum r}. \end{aligned} \quad (13.12)$$

На форму механических характеристик двигателя влияет величина основного магнитного потока возбуждения Φ . При уменьшении Φ (при возрастании сопротивления резистора $r_{\text{пер}}$) увеличиваются частота вращения холостого хода двигателя n_0 и перепад частоты вращения Δn . Это приводит к значительному изменению жесткости механической характеристики двигателя (рис. 13.13, б). Если же изменять напряжение на обмотке якоря U (при неизменных $R_{\text{доб}}$ и $r_{\text{пер}}$), то меняется n_0 , а Δn остается неизменным [см. (13.10)]. В итоге механические характеристики смещаются вдоль оси ординат, оставаясь параллельными друг другу (рис. 13.13, в). Это создает наиболее благоприятные условия при регулировании частоты вращения двигателей путем изменения напряжения U , подводимого к цепи якоря. Такой метод регулирования частоты вращения получил наибольшее распространение еще и благодаря разработке и широкому применению регулируемых тиристорных преобразователей напряжения.

Ответственным моментом при эксплуатации двигателей постоянного тока является их **пуск**. При включении двигателя в сеть в начальный момент ток в цепи якоря ограничивается лишь электрическим сопротивлением цепи якоря, так как в неподвижном якоре ЭДС не индуцируется. Поэтому начальный пусковой ток при непосредственном включении двигателя в сеть может достигать опасных значений, способных нарушить работу щеточно-коллекторного узла и вызвать «круговой огонь» на коллекторе. Кроме того, такой ток создаст чрезмерно большой пусковой момент, оказывающий на вращающиеся части электропривода ударное воздействие, способное выз-

вать их механическое разрушение. Эффективным средством ограничения пускового тока в двигателях постоянного тока является применение *пусковых реостатов*. Существует два метода расчета пусковых реостатов: графический и аналитический.

В основе *графического метода* лежит пусковая диаграмма двигателя. Пусковая диаграмма, представленная на рис. 13.14, совмещена с трехступенчатым пусковым реостатом; $K1$, $K2$ и $K3$ являются контактами силовых контакторов, посредством которых осуществляется переключение ступеней реостата, а $r_{\text{доб1}}$, $r_{\text{доб2}}$ и $r_{\text{доб3}}$ — резисторы ступеней пускового реостата. Механические характеристики 1, 2, 3 соответствуют ступеням пускового реостата $R_{\text{пр1}}$, $R_{\text{пр2}}$ и $R_{\text{пр3}}$.

Значения начального пускового тока I_1 и тока переключений I_2 обычно принимают

$$I_1 = (1,5 - 2,5) I_{\text{аном}};$$

$$I_2 = (1,0 - 1,3) I_{\text{аном}},$$

при этом ток переключений I_2 должен быть не меньше тока нагрузки, соответствующего статическому моменту сопротивления нагрузки M_c , на вал двигателя. Для двигателей специального назначения, с тяжелыми условиями работы, например двигателей краново-металлургических серий, указанные значения токов могут быть увеличены.

При *аналитическом методе* расчет сопротивлений резисторов пускового реостата ведут по формулам:

$$\left. \begin{aligned} r_{\text{доб3}} &= \sum r(\lambda - 1); \\ r_{\text{доб2}} &= r_{\text{доб3}} \lambda; \\ r_{\text{доб1}} &= r_{\text{доб2}} \lambda. \end{aligned} \right\} \quad (13.13)$$

В этих выражениях $\lambda = I_1/I_2$ представляет собой отношение началь-

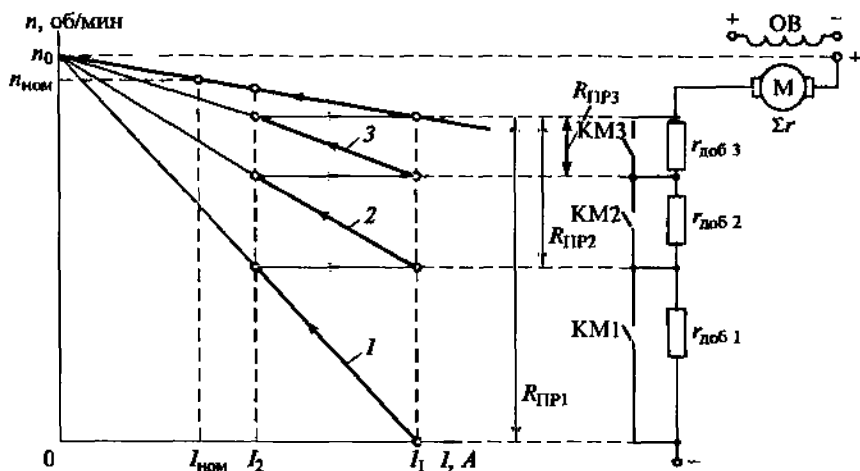


Рис. 13.14. Пусковая диаграмма двигателя постоянного тока с трехступенчатым пусковым реостатом

го пускового тока I_1 к току переключений I_2 .

При работе двигателя от регулируемого преобразователя напряжения необходимость в пусковом реостате отпадает, так как пуск двигателя можно начинать с любого пониженного значения напряжения на обмотке якоря в соответствии с допустимым значением начального пускового тока.

Помимо основного (двигательного) режима работы в двигателях постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения возможны *тормозные режимы*.

Генераторное рекуперативное торможение. Этот режим наступает, когда частота вращения якоря превышает частоту вращения холостого хода n_0 .

В этих условиях ЭДС машины $E_a = c_e \Phi n_0$ превышает напряжение питающей сети ($E_a > U_{ном}$), при этом ток якоря, а следовательно, и электромагнитный момент меняют свое направление на противоположное. В итоге машина постоянного тока переходит в генераторный режим и вырабатываемую при этом электроэнергию отдает

в сеть. Электромагнитный момент двигателя становится тормозящим и противодействует внешнему вращающему моменту, создаваемому силами инерции вращающего с прежней скоростью якоря (рис. 13.15, а). Этот процесс торможения будет продолжаться до тех пор, пока частота вращения якоря, уменьшаясь, не достигнет значения n_0 .

Таким образом, для перехода двигателя в режим генераторного рекуперативного торможения не требуется изменений в схеме включения двигателя.

Генераторное рекуперативное торможение — наиболее экономичный вид торможения, так как он сопровождается возвратом энергии в сеть. Применение этого способа торможения является эффективным энергосберегающим средством в электроприводе. Он целесообразен в электротранспортных средствах, работа которых связана с частыми остановками и движением под уклон. В этом случае кинетическая энергия движения транспортного средства (трамвай, троллей-

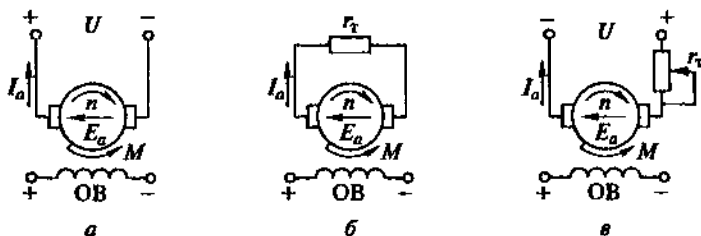


Рис. 13.15. Тормозные режимы двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения:

а — генераторный рекуперативный; *б* — динамический; *в* — противовключением

бус, электропоезд) преобразуется в электрическую энергию и возвращается в сеть.

Возможен способ перевода двигателя в режим генераторного рекуперативного торможения и при установившейся частоте вращения якоря. Для этого необходимо увеличить в двигателе магнитный поток возбуждения, т.е. ток в обмотке возбуждения.

Из выражения ЭДС якоря $E_a = c_e \Phi n$ следует, что с ростом магнитного потока возбуждения Φ при неизменной частоте вращения n ЭДС якоря E_a увеличивается, что ведет к уменьшению тока в цепи якоря:

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum r + R_{\text{доб}}} = \frac{U - c \Phi n}{\sum r + R_{\text{доб}}}. \quad (13.14)$$

При ЭДС $E_a = U$ ток якоря $I_a = 0$, а частота вращения якоря достигает значения $n = n_0$. При дальнейшем увеличении потока возбуждения Φ , а следовательно, возрастании ЭДС якоря E_a пограничная частота вращения снижается (см. 13.12, б), а частота вращения якоря, оставаясь практически неизменной за счет сил инерции вращающихся частей электропривода, начинает превышать пограничную частоту n_0 . При этом ЭДС якоря превышает напряжение сети и двигатель переходит в режим генераторного рекуперативного торможения.

Динамическое торможение. Необходимость в таком торможении возникает в том случае, когда после отключения двигателя от сети его якорь под действием кинетической энергии движущихся масс электропривода продолжает вращаться. Если при этом обмотку якоря, отключив от сети, замкнуть на резистор r_T , то двигатель перейдет в генераторный режим (обмотка возбуждения должна оставаться включенной в сеть). Вырабатываемая при этом электроэнергия не возвращается в сеть, как это происходит при рекуперативном торможении, а преобразуется в теплоту, которая выделяется в сопротивлении

$$R = \sum r + r_T.$$

В режиме динамического торможения ЭДС якоря не меняет своего направления, но поскольку якорь отключен от сети ($U = 0$), то ток якоря изменит направление, так как будет создаваться ЭДС E_a ,

$$I_a = \frac{U - E_a}{R} = -\frac{E_a}{R},$$

т.е. станет *отрицательным*. В результате электромагнитный момент также изменит направление и станет *тормозящим* (рис. 13.15, б). Процесс торможения продолжается до полной остановки якоря ($n = 0$).

Торможение противовключением.

Допустим, что двигатель работает в основном (двигательном) режиме с номинальной нагрузкой. При отключении двигателя от сети вращающий момент $M = 0$, но якорь двигателя за счет кинетической энергии вращающихся масс электропривода некоторое время будет продолжать вращение, т. е. произойдет *выбег* двигателя.

Чтобы уменьшить время выбега двигателя, применяют торможение противовключением. С этой целью изменяют полярность напряжения на клеммах обмотки якоря (полярность клемм обмотки возбуждения должна остаться прежней) и напряжение питания обмотки якоря становится отрицательным ($-U$). Но якорь двигателя под действием кинетической энергии вращающихся масс электропривода сохраняет прежнее (положительное) направление вращения, и так как направление магнитного потока не изменилось, то ЭДС якоря E_a также не меняет своего направления и действует согласно напряжению ($-U$), при этом ток якоря создается суммой напряжения сети U и ЭДС якоря E_a (рис. 13.15, в):

$$I_a = \frac{(-U) + (-E_a)}{\sum r + r_T},$$

где r_T — сопротивление резистора в цепи якоря двигателя.

В этих условиях электромагнитный момент станет *отрицательным*.

Под действием тормозящего момента $-M_T$ частота вращения якоря уменьшается, достигнув нулевого значения. Если в этот момент цепь якоря не отключить от сети, то произойдет *реверсирование* двигателя и его якорь под действием момента, который прежде был тормозным, начнет вращение в противоположную сторону. При этом

двигатель перейдет в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения и вращающего момента. Во избежание нежелательного реверсирования операцию торможения противовключением автоматизируют, чтобы при нулевом значении частоты вращения цепь якоря отключалась от сети.

13.6. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения

Отличительным признаком этих двигателей является последовательное соединение обмоток якоря и возбуждения, отчего ток нагрузки двигателя является и током возбуждения (рис. 13.16, а). По этой причине магнитный поток возбуждения в двигателе последовательного возбуждения зависит от нагрузки.

При небольшой нагрузке магнитная система двигателя не насыщена и магнитный поток пропорционален току нагрузки

$$\Phi = c_\Phi I_a,$$

где c_Φ — коэффициент пропорциональности между током якоря I_a и потоком возбуждения Φ .

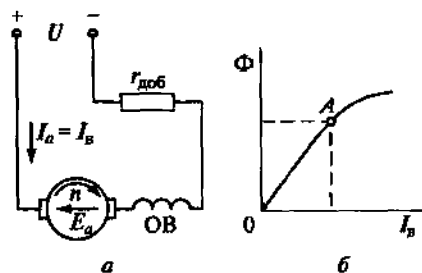


Рис. 13.16. Двигатель последовательного возбуждения:

а — схема соединений; б — график намагничивания

Переходя к выражению электромагнитного момента двигателя последовательного возбуждения с ненасыщенной магнитной системой, получим

$$M = c_m \Phi I_a = c_m c_\Phi I_a^2,$$

т.е. в двигателе с *ненасыщенной* магнитной системой электромагнитный момент M пропорционален квадрату тока нагрузки I_a^2 .

Уравнение механической характеристики двигателя последовательного возбуждения имеет вид:

$$n = C_1 M^{-1/2} - B, \quad (13.15)$$

где C_1 и B — постоянные коэффициенты.

Из полученного уравнения, соответствующего ненасыщенной магнитной системе двигателя, следует, что *механическая характеристика* представляет собой степенную функцию, т.е. эта характеристика *криволинейна* (рис. 13.17). Однако при нагрузке двигателя $M > 0,8 M_{\text{ном}}$ магнитная система насыщается (см. рис. 13.16, б, точка А) и прямолинейная зависимость $\Phi = f(I_a)$ нарушается. Поэтому приведенное выше уравнение (13.15) определяет форму механической характеристики лишь ее начальной части, соот-

ветствующей нагрузке двигателя последовательного возбуждения $M < 0,8 M_{\text{ном}}$.

Изложенное о свойствах двигателей постоянного тока последовательного возбуждения позволяет сделать следующие выводы.

1. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения *криволинейна*, при этом жесткость характеристики на разных ее участках неодинакова: при малых нагрузках частота вращения двигателя значительна и характеристика очень мягкая. С увеличением нагрузки характеристика становится более жесткой, а при номинальной нагрузке — еще более жесткой. Объясняется это тем, что при токе нагрузки $I_a > I_{a\text{ном}}$ магнитная система насыщается и магнитный поток возбуждения при дальнейшем увеличении нагрузки остается практически неизменным, не зависящим от тока нагрузки.

2. Механическая характеристика *не пересекает ось ординат*, так как при отсутствии нагрузки двигателя ($M \approx 0$) частота вращения возрастает неограниченно. По этой причине не допускается работа двигателей последовательного возбуждения при нагрузке, составляющей менее 25 % от номинальной ($M < 0,25 M_{\text{ном}}$), а тем более в режиме холостого хода. Чтобы исключить возникновение режима холостого хода (что привело бы к «разносу» двигателя) в приводах с двигателями последовательного возбуждения недопустимо применение ременных передач и фрикционных муфт для передачи вращательного движения на рабочий механизм.

Потребляемая двигателем мощность, Вт,

$$P_1 = UI_a \approx A\sqrt{M},$$

где A — постоянный коэффициент.

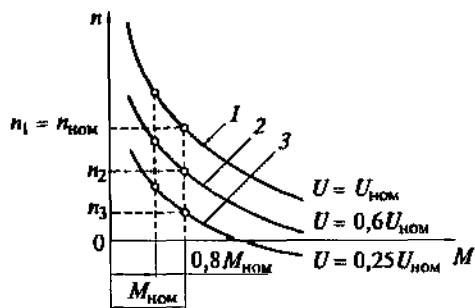


Рис. 13.17. Механические характеристики электропривода с двигателем последовательного возбуждения:

1 — естественная; 2, 3 — искусственные

Из рассмотренного следует, что у двигателей последовательного возбуждения при изменении момента нагрузки M в широких пределах потребляемая мощность P_1 и ток якоря I_a изменяются в *меньших* пределах, чем у двигателей независимого (параллельного) возбуждения, для которых выражение потребляемой мощности имеет вид

$$P_1 = UI_a \approx A_1 M,$$

где A_1 — постоянный коэффициент.

Например, в двигателе последовательного возбуждения при увеличении момента нагрузки в четыре раза потребляемая мощность P_1 возрастает лишь в два раза, а в двигателе независимого (параллельного) возбуждения — в четыре раза. Объясняется это тем, что при последовательном возбуждении увеличение нагрузки двигателя сопровождается одновременным ростом как тока якоря, так и магнитного потока возбуждения, и оба этих параметра способствуют увеличению вращающего момента. Это свойство двигателей последовательного возбуждения определяет области их применения — привод механизмов с тяжелыми условиями пуска и работы: частые пуски, реверсы, перегрузки. Обычно двигатели постоянного тока последовательного возбуждения применяют для привода подъемных устройств и транспортных средств в качестве тяговых двигателей (трамваи, электропоезда, метро, электровозы).

В связи с отсутствием уравнений, позволяющих рассчитать механические характеристики двигателя последовательного возбуждения, пользуются *универсальными естественными характеристиками* (рис. 13.18), построенными в относительных единицах: тока $I^* = I_a/I_{a\text{ном}}$; момента $M^* = M/M_{\text{ном}}$; частоты вращения в режиме *естест-*

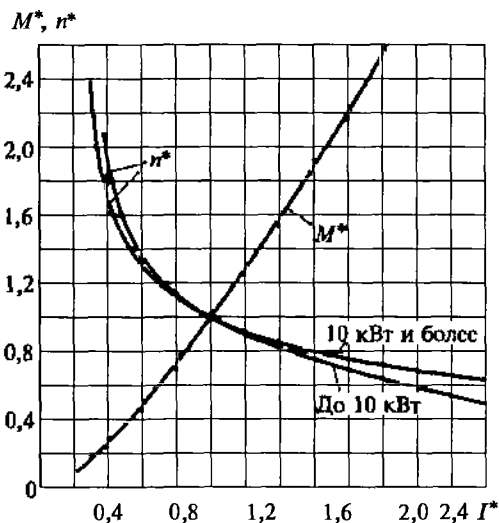


Рис. 13.18. Универсальные естественные характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения

венной механической характеристики $n^* = n_e/n_{\text{ном}}$. В каталогах некоторых серий, например серии Д крановых и металлургических двигателей, приводятся рабочие характеристики для каждого типоразмера двигателя.

В двигателях постоянного тока последовательного возбуждения возможны *тормозные режимы*.

Генераторное рекуперативное торможение при последовательном возбуждении двигателя невозможно, так как такой двигатель не может работать в режиме холостого хода. Тем не менее рекуперативное торможение тяговых двигателей последовательного возбуждения применяют на электротранспорте, но в этом случае меняется схема соединений двигателя — он переключается на независимое возбуждение.

Динамическое торможение в двигателях последовательного возбуждения возможно по двум схемам включения: по схеме независимого возбуж-

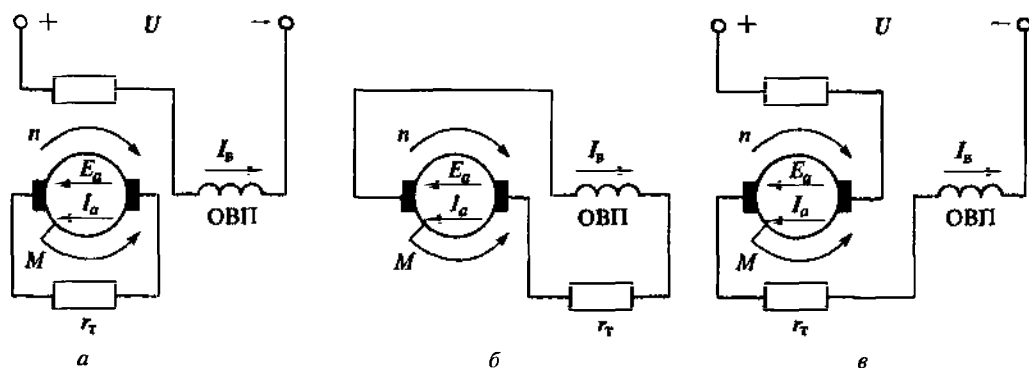


Рис. 13.19. Двигатель последовательного возбуждения в тормозных режимах:

а, б — динамическом; в — противовключением

дения и по схеме самовозбуждения. При схеме с независимым питанием обмотки возбуждения для ограничения тока в этой обмотке в цепь возбуждения последовательно включают резистор (рис. 13.19, а).

Процесс торможения протекает так же, как и в двигателе независимого возбуждения.

Динамическое торможение по схеме с самовозбуждением (рис. 13.19, б) предусматривает отключение от сети обмотки возбуждения и подключение ее к якору через резистор r_t таким образом, чтобы магнитный поток Φ при переходе двигателя в режим торможения не изменил своего направления, так как в противном случае будет подавлен поток остаточного магнетизма и двигатель размагнитится. В этом случае ЭДС в обмотке якоря не будет индуцироваться и торможения не произойдет.

Торможение противовключением происходит так же, как и в двигателях с независимым возбуждением при изменении полярности напряжения на клеммах цепи якоря; при этом меняется направление тока в обмотке якоря и если направление тока в обмотке возбуждения останется неизменным

(рис. 13.19, в), электромагнитный момент изменит свое направление и станет тормозящим.

13.7. Двигатель постоянного тока смешанного возбуждения

Такие двигатели имеют две обмотки возбуждения: независимую, или параллельную, ОВ1 и последовательную ОВ2 (см. рис. 13.11, з). Обе обмотки включают согласованно, так чтобы их намагничивающие силы были направлены в одну сторону. Встречное включение обмоток возбуждения недопустимо, так как при нагрузке двигателя последовательная обмотка возбуждения будет размагничивать магнитную систему двигателя и его работа станет неустойчивой.

Благодаря наличию независимой (параллельной) обмотки возбуждения, двигатели смешанного возбуждения могут работать в режиме холостого хода, а следовательно, в них возможен генераторный рекуперативный режим торможения.

Наличие двух обмоток возбуждения увеличивает габариты, массу и стоимость двигателей смешанного воз-

буждения по сравнению с двигателями независимого и последовательного возбуждения. Это ограничивает их применение лишь в случаях, когда от приводного двигателя требуется сочетание хороших регулировочных свойств с устойчивой работой при резких колебаниях нагрузки и перегрузке. Но и здесь целесообразность применения двигателей смешанного возбуждения должна быть подтверждена технико-экономическими расчетами.

13.8. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

Частота вращения двигателей постоянного тока определяется выражением

$$n = \frac{U - I_a (\sum r + r_{\text{доб}})}{c_e \Phi},$$

откуда следует, что регулирование частоты вращения возможно следующими способами:

- изменением сопротивления реостата $r_{\text{доб}}$ в цепи якоря;
- изменением магнитного потока возбуждения Φ (изменением тока в цепи возбуждения I_v);
- изменением напряжения U , подводимого к цепи якоря.

Способы регулирования оцениваются плавностью и диапазоном регулирования, экономичностью (величиной потерь и стоимостью применяемой аппаратуры).

Регулирование частоты вращения изменением сопротивления реостата $r_{\text{доб}}$ в цепи якоря возможно только в сторону ее уменьшения «вниз» от номинальной. С увеличением сопротивления $r_{\text{доб}}$ уменьшается угол наклона искусственной механической характери-

ки к оси ординат, т.е. характеристика становится более мягкой, что ведет к увеличению перепада частоты вращения Δn при изменениях нагрузки M (см. рис. 13.13, а).

Для двигателя последовательного возбуждения механические характеристики с увеличением $r_{\text{доб}}$ также становятся более мягкими. *Достоинства* регулирования частоты вращения изменением сопротивления $r_{\text{доб}}$ в цепи обмотки якоря — простота реализации и плавность (в зависимости от числа ступеней регулировочного реостата).

Недостатки — неэкономичность, обусловленная электрическими потерями в реостате $r_{\text{доб}}$, величина которых пропорциональна квадрату тока якоря, и, как следствие, уменьшение полезной мощности двигателя за счет роста потерь; возможность регулирования частоты вращения только «вниз» от номинальной.

Регулирование частоты вращения изменением магнитного потока возбуждения Φ в двигателе независимого (параллельного) возбуждения реализуется посредством реостата $r_{\text{пр}}$ в цепи обмотки возбуждения (рис. 13.20, а). Так, при увеличении сопротивления этого реостата уменьшаются ток возбуждения и магнитный поток Φ , что сопровождается повышением частоты вращения.

В режиме холостого хода или при небольшом нагрузочном моменте на валу двигателя значительное уменьшение потока возбуждения Φ сопровождается значительным ростом частоты вращения до значений, во много раз превышающих номинальную частоту вращения двигателя, что является недопустимым по условиям коммутации и механической прочности двигателя, так как может привести к его «разносу». Учитывая это, при выборе реос-

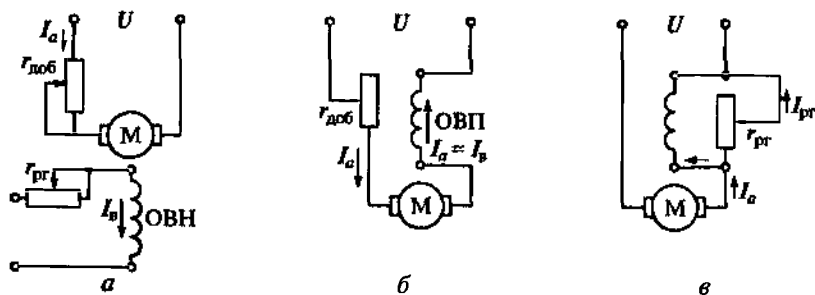


Рис. 13.20. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока:

а — независимого возбуждения; б и в — последовательного возбуждения

тата $r_{\text{пр}}$ необходимо, чтобы при полностью введенном его сопротивлении ($r_{\text{пр}} = r_{\text{max}}$) частота вращения двигателя не превысила предельно допустимого значения.

Необходимо также следить за надежностью электрических соединений в цепи обмотки возбуждения двигателя, так как при размыкании этой цепи магнитный поток уменьшается до значения потока остаточного магнетизма $\Phi_{\text{ост}}$, при котором частота вращения может достигнуть недопустимого значения.

Так как регулировка тока возбуждения посредством реостата в двигателях независимого (параллельного) возбуждения происходит не в силовой цепи (цепи якоря), а в цепи возбуждения, где ток в двигателях большой и средней мощности не превышает 10—15 % от номинального тока якоря, то потери в этом реостате незначительны. Это свидетельствует об экономичности рассматриваемого способа регулирования частоты вращения. Недостаток рассмотренного способа регулирования частоты вращения состоит в том, что при изменении магнитного потока Φ меняется угол наклона механической характеристики, т.е. меняется ее жесткость (см. рис. 13.13, б). Кроме того, значительное уменьше-

ние тока возбуждения ограничено, во-первых, предельно допустимой частотой вращения двигателя по условиям коммутации и механической прочности двигателя и, во-вторых, значительное размагничивание двигателя при уменьшении тока возбуждения может привести к «опрокидыванию» магнитного поля машины, т.е. перемагничиванию ее полюсов. Причина этого явления — действие реакции якоря по поперечной оси. Обычно допустимый диапазон регулирования частоты вращения указывается в каталоге на конкретный тип двигателя.

Рассмотренный способ регулирования частоты вращения прост в реализации и применяется при необходимости регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока «вверх» от номинальной.

Регулирование частоты вращения изменением напряжения, подводимого к цепи якоря, может происходить только «вниз» от номинальной частоты вращения, так как подавать на двигатель напряжение выше номинального недопустимо по условиям коммутации и электрической прочности изоляции.

Влияние величины напряжения U на вид механических характеристик было рассмотрено в 13.5 для двигателей независимого (параллельного)

возбуждения (рис. 13.21, а): с уменьшением напряжения механические характеристики смещаются вдоль оси ординат, оставаясь параллельными естественной механической характеристике (при $U = U_{\text{ном}}$). Такое же влияние напряжения U и в двигателях последовательного возбуждения (рис. 13.21, б).

Основным способом изменения напряжения, подводимого к двигателю в современном электроприводе, является его питание от управляемого тиристорного преобразователя напряжения. Электропривод с применением такого преобразователя называют *тиристорным*. Питание цепей якоря и возбуждения в тиристорном электроприводе должно быть раздельным (независимым), чтобы изменение напряжения в цепи якоря не сопровождалось изменением напряжения в цепи возбуждения.

Возможно также регулирование подводимого напряжения при питании двигателя от индивидуального генератора постоянного тока в системе «генератор — двигатель».

Достоинствами способа регулирования частоты вращения изменением подводимого напряжения являются: стабильность механических характеристик, плавность и широкий диапазон регулирования. Что же касается эко-

номичности, то сам процесс регулирования экономичен, так как не сопровождается значительными потерями, но для его реализации требуются специальные тиристорные устройства. Но, несмотря на это, способ управления двигателями постоянного тока с применением тиристорных преобразователей получил широкое применение, так как эти тиристорные устройства обеспечивают не только регулирование частоты вращения, но и «мягкий» пуск двигателей без применения пусковых реостатов.

При совместной работе нескольких однотипных двигателей последовательного возбуждения частоту вращения можно регулировать изменением схемы их включения (рис. 13.22). Так, при параллельном включении двигателей (верхнее положение рубильника) каждый из них оказывается под полным напряжением сети U , а при последовательном включении (нижнее положение рубильника) каждый из двигателей оказывается под напряжением $U/2$. Если количество двигателей более двух, то возможно большее число вариантов их включения с более плавным переходом от минимального напряжения к максимальному. Этот способ регулирования применяют в магистральных электровозах, где одно-

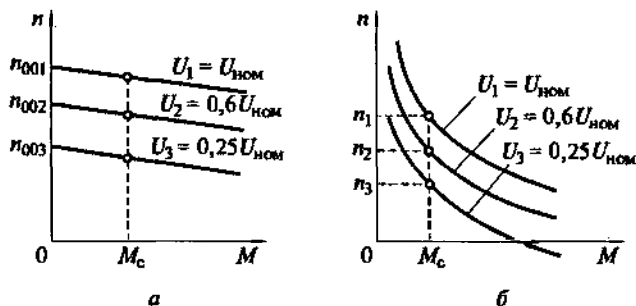


Рис. 13.21. Механические характеристики двигателя независимого (а) и последовательного (б) возбуждения при изменении подводимого к цепи якоря напряжения

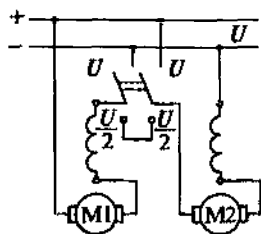


Рис. 13.22. Регулирование напряжения, подводимого к двигателям последовательного возбуждения методом переключения схемы соединения

временно работает несколько (шесть и более) тяговых двигателей, что позволяет получить большое число вариантов их включения.

Импульсное регулирование электропривода с двигателем постоянного тока.

Принцип импульсного регулирования частоты вращения двигателя рассмотрен в 4.13 применительно к асинхронным двигателям. Сущность его состоит в том, что цепь якоря двигателя периодически подключается к сети напряжением $U_{\text{н}}$, а затем отключается (рис. 13.23, а). Выполняется это посредством ключа QS (обычно бесконтактного). Обмотка возбуждения ОБ двигателя при этом остается включенной в сеть постоянного тока на напряжение $U_{\text{в}}$. В этом случае двигатель остается постоянно возбужденным, а напряжение в цепь якоря подается импульсами. На диаграмме рис. 13.23, б импульсы напряжения имеют прямоугольную форму высотой $U_{\text{н}}$. При этом импульсы продолжительностью t чередуются с паузами продолжительностью $t_{\text{п}}$. За время импульса ток в цепи якоря $i_{\text{а}}$, обладающей некоторой индуктивностью $L_{\text{а}}$, нарастает постепенно, достигая в конце импульса наибольшего значения $I_{\text{мах}}$. При прекращении импульса, т. е. при размыкании цепи якоря ключом, ток в якорь, об-

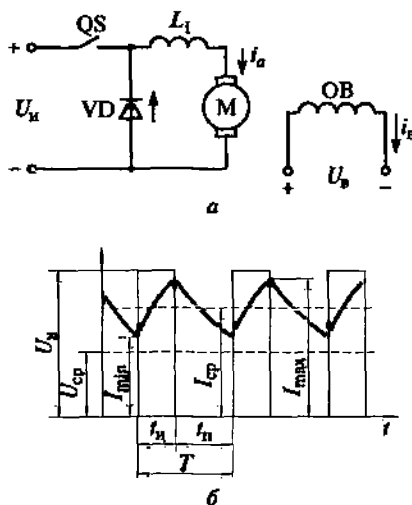


Рис. 13.23. Импульсное регулирование частоты вращения электропривода с двигателем постоянного тока

ладающий индуктивностью, уменьшается также постепенно, так как поддерживается за счет ЭДС самоиндукции, наводимой в цепи якоря с дросселем $L_{\text{а}}$. Поэтому за время паузы, когда цепь якоря разомкнута, ток якоря не исчезает, а, замыкаясь через диод VD, уменьшается постепенно, достигнув значения $I_{\text{мин}}$ к началу следующего импульса напряжения. При этом цепь якоря оказывается под некоторым постоянно действующим средним напряжением $U_{\text{ср}}$, В,

$$U_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ном}} t_{\text{и}}}{T} = \gamma U_{\text{ном}},$$

где $\gamma = t_{\text{и}}/T$ — коэффициент управления (скважность).

Частота вращения двигателя при импульсном регулировании, об/мин,

$$n = \frac{\gamma U - I_{\text{а}} \sum r}{c_{\text{е}} \Phi}. \quad (13.16)$$

Дроссель индуктивностью $L_{\text{а}}$ совместно с индуктивностью якоря $L_{\text{а}}$ снижает пульсации тока в цепи якоря.

Если параметры схемы выбраны так, что пульсация тока не превышает 10 %, то работа двигателя при импульсном управлении по величине потерь в цепи якоря практически не отличается от работы при постоянно действующем напряжении. При большей величине пульсаций тока в цепи якоря возникают дополнительные пульсационные потери.

13.9. Универсальные коллекторные двигатели

Универсальными называют коллекторные двигатели, которые могут работать как от сети постоянного, так и от сети однофазного переменного тока.

Однофазные коллекторные двигатели обычно имеют последовательное возбуждение. Применение параллельного возбуждения в данном случае ограничено из-за большой индуктивности параллельной обмотки возбуждения, имеющей большое число вит-

ков (рис. 13.24, а и б). Это создает значительный фазовый сдвиг между током якоря $\dot{I}_a$ и током возбуждения $\dot{I}_b$ на угол ψ . Среднее значение электромагнитного момента в этом случае определяется выражением, учитывающим угол сдвига фаз между током якоря и магнитным потоком:

$$M_{\text{пар}} = c_m \frac{\Phi_{\text{max}}}{\sqrt{2}} I_a \cos(\psi + \delta), \quad (13.17)$$

где Φ_{max} — максимальное значение магнитного потока; ψ — угол сдвига фаз между током якоря и током возбуждения; δ — угол сдвига фаз между током возбуждения и магнитным потоком, обусловленный наличием магнитных потерь в машине [$\psi + \delta \approx 90^\circ$, а следовательно, $\cos(\psi + \delta) \approx 0$].

В двигателе последовательного возбуждения (рис. 13.24, в) ток якоря I_a и ток возбуждения I_b совпадают по фазе: $\psi = 0$ (рис. 13.24, г). Поэтому среднее значение электромагнитного вращающего момента в двигателе последовательного возбуждения $M_{\text{посл}}$ больше,

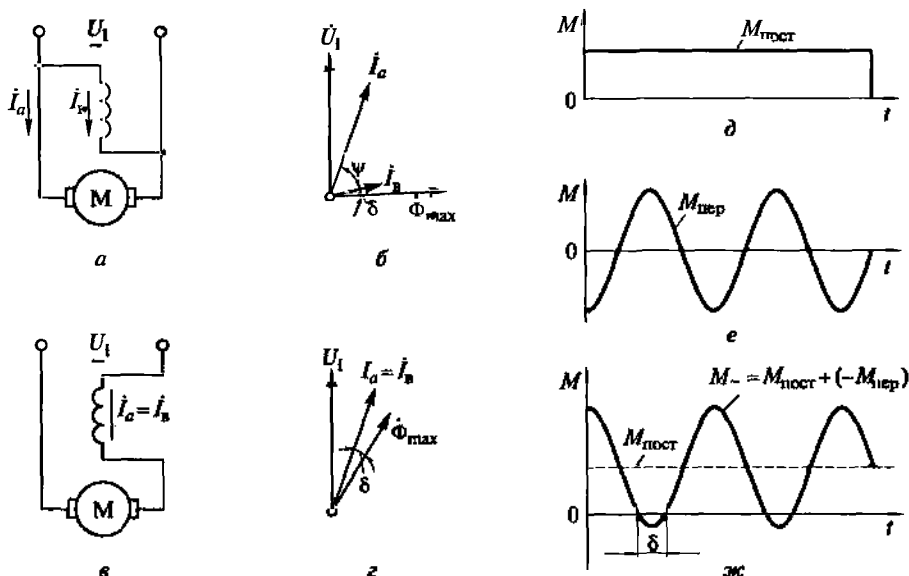


Рис. 13.24. К принципу действия универсального коллекторного двигателя

чем в двигателе параллельного возбуждения:

$$M_{\text{посл}} = c_m \frac{\Phi_{\text{max}}}{\sqrt{2}} I_a \cos \delta.$$

Электромагнитный момент двигателя последовательного возбуждения при работе от сети переменного тока имеет постоянную составляющую $M_{\text{пост}}$ (рис. 13.24, д) и переменную составляющую $M_{\text{пер}}$, изменяющуюся с частотой, равной удвоенной частоте сети f_1 (рис. 13.24, е). Результирующий момент этого двигателя является пульсирующим (рис. 13.24, ж):

$$M_{\Sigma} = M_{\text{пост}} + (-M_{\text{пер}}).$$

Небольшие участки графика $M=f(t)$ с отрицательным (тормозящим) моментом обусловлены фазовым сдвигом между магнитным потоком Φ_{max} и током I_a (рис. 13.24, з). Пульсации момента M_{Σ} практически не нарушают работу двигателя, включенного в сеть переменного тока, так как сглаживаются за счет момента инерции вращающегося якоря.

По своей конструкции универсальные коллекторные двигатели отличаются от двигателей постоянного тока тем, что их станина и главные полюсы делаются шихтованными из тонколистовой электротехнической стали. Это дает возможность сократить магнитные потери, которые при работе двигателя от сети переменного тока повышаются, так как переменный ток в обмотке возбуждения вызывает перемагничивание всей магнитной цепи, включая станину и сердечники полюсов.

Основной *недостаток* однофазных коллекторных двигателей — тяжелые условия коммутации. Дело в том, что в коммутирующих секциях помимо реактивной ЭДС и ЭДС внешнего поля (см. 13.3) наводится трансформаторная ЭДС $e_{\text{тр}}$, что ухудшает коммутацию.

Применение в обмотке якоря двигателя одновитковых секций ($w_c = 1$) способствует ограничению ЭДС $E_{\text{тр}}$, но при этом увеличивается количество пластин в коллекторе, а следовательно, возрастают его размеры. Применение добавочных полюсов с обмот-

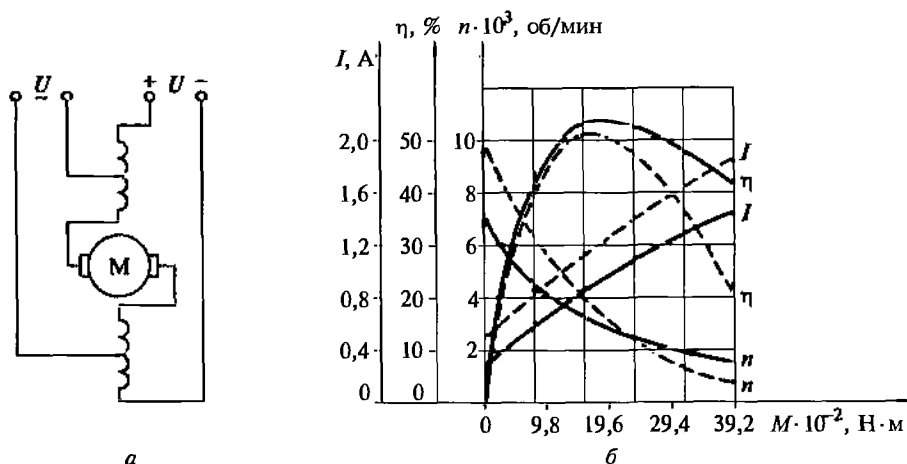


Рис. 13.25. Схема соединений и рабочие характеристики универсального коллекторного двигателя:

— — постоянный ток; --- — переменный ток

кой, включенной последовательно в цепь якоря, позволяет добиться полной взаимной компенсации трансформаторной ЭДС только при определенных значениях тока якоря и частоты вращения. При других режимах работы двигателя условия коммутации остаются тяжелыми.

Регулирование частоты вращения и реверсирование однофазного коллекторного двигателя выполняются так же, как и в двигателях постоянного тока последовательного возбуждения.

В универсальном коллекторном двигателе стремятся получить примерно одинаковые рабочие свойства 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. 13.25, *а*).

Расхождения в характеристиках двигателя на постоянном и переменном токе объясняются тем, что при работе от сети переменного 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. 13.25, *б* приведены рабочие характеристики универсального коллекторного двигателя. Потребляемый двигателем ток при работе от сети переменного тока больше, чем при работе этого же двигателя от сети постоянного тока, так как переменный ток кроме активной имеет еще и реактивную составляющие. Коэффициент полезного действия универсальных двигателей при пере-

менном токе ниже, чем при постоянном, что вызвано повышенными магнитными потерями, обусловленными переменным потоком возбуждения.

13.10. Машины постоянного тока нетрадиционной конструкции

13.10.1. Машины постоянного тока с постоянными магнитами

В отличие от машин постоянного тока традиционной конструкции с электромагнитным возбуждением в машинах с постоянными магнитами возбуждающее магнитное поле создается постоянными магнитами. Якорь и щеточно-коллекторный узел этих машин имеет обычную конструкцию. Что же касается магнитных систем, то они могут иметь разную форму (рис. 13.26).

Для машин с большим числом полюсов ($2p \geq 4$) целесообразно радиальное расположение постоянных магнитов (рис. 13.26, *а*). Недостаток этой конструкции — небольшая осевая длина каждого магнита и значительная подверженность таких магнитов размагничивающему влиянию реакции якоря. Это ведет к необходимости изготовления постоянных магнитов из материала с особо большой коэрцитивной силой (ферритбариевые).

При $2p = 2$ постоянные скобообразные магниты (рис. 13.26, *б*) имеют большую длину и способны создавать значительное магнитное поле даже при сравнительно небольшой коэрцитивной силе материалов для изготовления постоянных магнитов (альни, альнико, магнико).

Магнитная система с кольцевым магнитом (рис. 13.26, *в*) более рациональна и имеет наибольшее применение.

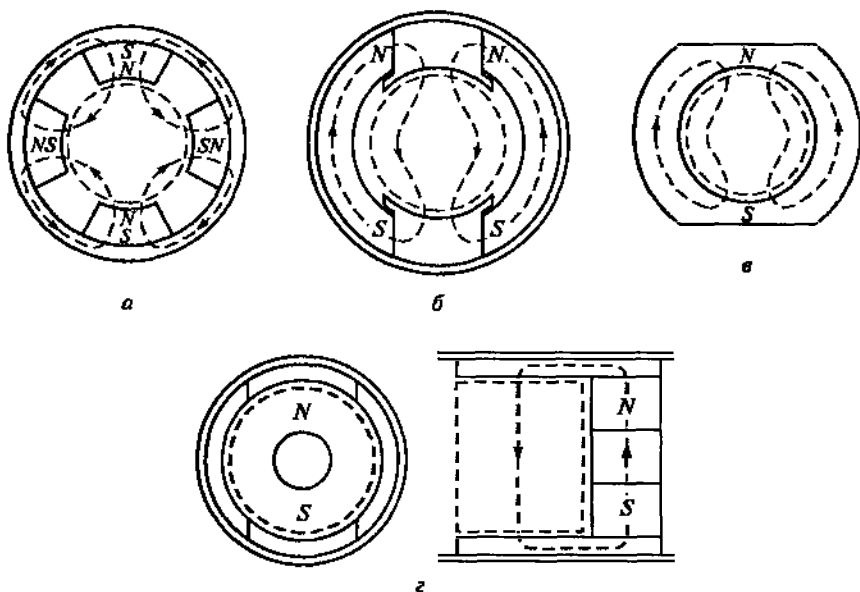


Рис. 13.26. Магнитные системы двигателей постоянного тока с постоянными магнитами: *а* — с радиальным расположением магнитов; *б* — со скобообразными магнитами; *в* — с кольцевым магнитом; *г* — с торцевым расположением кольцевого магнита

ние. «Площадки» у полюсов постоянного магнита сделаны для уменьшения его массы, так как в этих местах постоянный магнит менее использован.

Магнитная система с торцевым магнитом (рис. 13.26, *г*) обеспечивает двигателю минимальный диаметр за счет увеличения его длины. Машины постоянного тока с постоянными магнитами, как правило, используют при небольшой мощности, поэтому необходимость применения в них добавочных полюсов отпадает. Обычно машины постоянного тока с постоянными магнитами мощностью от единиц до сотен ватт используют в качестве двигателей для привода устройств бытовой техники, электроинструмента в автоматических системах (исполнительные двигатели и тахогенераторы). Отсутствие у них обмотки возбужде-

ния намного упрощает схемы их включения.

13.10.2. Вентильный двигатель постоянного тока

Благодаря широкому применению управляемых полупроводниковых приборов — тиристоров и транзисторов, появилась возможность создать на основе этих элементов полупроводниковый коммутатор, способный заменить щеточно-коллекторный узел в машинах постоянного тока. Эти приборы работают в режиме ключа, т. е. они имеют два устойчивых состояния: открытое для прохождения тока и закрытое.

Вентильный двигатель постоянного тока представляет собой соединение синхронной машины с полупроводниковым коммутатором. В вентильном двигателе коммутатор выполняет

роль *инвертора* — преобразователя постоянного тока сети в переменный ток обмотки якоря. Что же касается свойств (характеристик) вентильного двигателя, то они зависят от способа управления полупроводниковыми элементами коммутатора. Если управление инвертором *независимое*, т.е. когда работа инвертора не определяется пространственным положением ротора двигателя, то вентильный двигатель по своим характеристикам в принципе не отличается от синхронного двигателя. Но основная задача создания вентильного двигателя — получить двигатель со свойствами коллекторного двигателя постоянного тока, а это оказывается возможным лишь при *зависимом* управлении работой коммутатора, т.е. переключение полупроводниковых элементов инвертора из открытого состояния в закрытое, и наоборот, должно происходить в зависимости от пространственного положения ротора.

Такое управление возможно лишь при наличии в двигателе датчика положения ротора (ДПР).

В вентильных двигателях небольшой мощности (нескольких сотен ватт) коммутаторы выполняют на транзисторах. В более мощных вентильных двигателях для этой цели применяют также и тиристоры, так как они способны коммутировать токи значительной величины. Однако тиристоры не полностью управляемые полупроводниковые приборы: посредством электрического сигнала тиристор можно открыть, но для того, чтобы его закрыть, требуется прекращение электрического тока в анодной цепи этого тиристора.

На рис. 13.27 представлена функциональная схема вентильного двигателя постоянного тока с применением тириستоров. Такой двигатель представляет собой систему, состоящую из собственно двигателя М, представляющего собой синхронный двигатель с электромагнитным возбуждением, датчика положения ротора (ДПР) и инвертора (И). Датчик положения ротора ДПР выдает сигналы, соответствующие положению ротора, на блок управления БУ инвертором. Эти сигналы поступают на

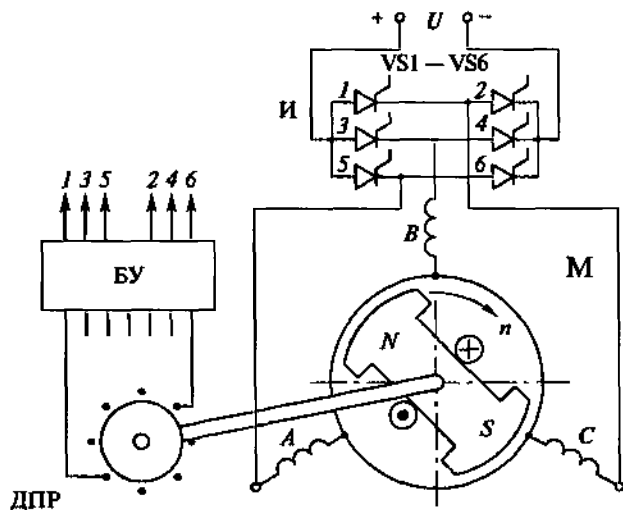


Рис. 13.27. Функциональная схема вентильного двигателя постоянного тока

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 на их аноды подведен «плюс» напряжения питания U , а тиристоры 2, 4 и 6 образуют катодную группу, так как на их катоды подведен «минус» напряжения питания.

В процессе вращения ротора его вращающееся магнитное поле индуцирует в фазных обмотках статора ЭДС, мгновенные значения которых e_A , e_B и e_C . По своей природе они являются противо-ЭДС, так как направлены встречно напряжению сети. Для того чтобы в обмотке статора протекал ток, необходимо, чтобы напряжение питания U преодолеvalo линейные значения ЭДС обмотки статора. Этот принцип положен в основу работы вентильного двигателя, так как в отдельные моменты времени мгновенные линейные значения противо-ЭДС обмотки статора (якоря) преодолевают напряжение сети, что ведет к разрыву тока в анодной цепи тиристоров, которые

в определенной последовательности закрываются.

Таким образом, в основе работы вентильного двигателя лежит органическое соединение инвертора и двигателя, т.е. инвертор не является автономным, так как сигналы на переключение его полупроводниковых элементов поступают от блока управления БУ в зависимости от пространственного положения ротора.

В вентильных двигателях небольшой мощности инвертор выполняют на транзисторах, в качестве датчиков положения ротора применяют датчики ЭДС Холла, а ротор представляет собой постоянный магнит. Такой двигатель иногда называют *бесконтактным двигателем постоянного тока* (БДПТ).

Вал двигателя Д (рис. 13.28, а) механически соединен с датчиком положения ротора (ДПР), сигнал от которого поступает в блок коммутатора (БК). Подключение секций обмотки якоря к источнику постоянного тока происходит через элементы блока коммутатора (БК). Назначение ДПР — выдавать управляющий сигнал в блок коммутатора в соответствии с поло-

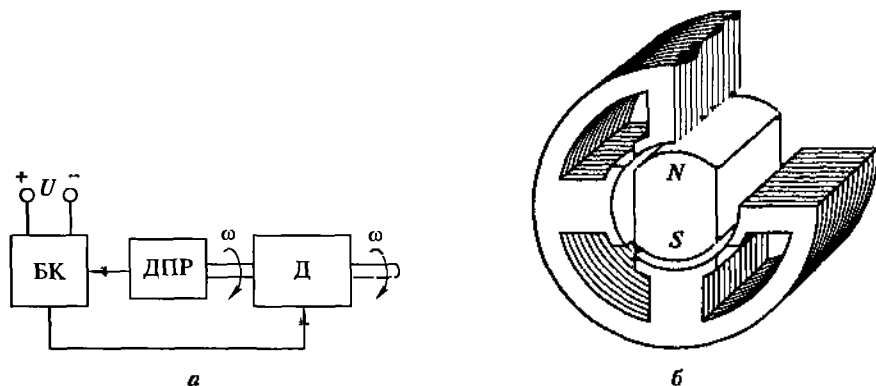


Рис. 13.28. Бесконтактный двигатель постоянного тока небольшой мощности:

а — блок-схема; б — магнитная система

жением полюсов постоянного магнита (ротора) относительно секций обмотки якоря. Это делается посредством датчиков. Блок коммутатора выполнен на транзисторах VT1 — VT4 (рис. 13.29). Четыре обмотки (фазы) двигателя w_1 — w_4 расположены на явно выраженных полюсах шихтованного сердечника якоря (см. рис. 13.28, б). Датчики Холла ДХ1 и ДХ2 установлены в пазах полюсных наконечников двух смежных полюсов статора. Силовые транзисторы VT1 — VT4 работают в ключевом режиме. Сигнал на открытие транзистора поступает от соответствующего датчика Холла. Каждая фазная обмотка выполнена из двух катушек, расположенных на противоположащих полюсах сердечника статора и соединенных последовательно (см. рис. 13.29). Если по какой-либо из обмоток статора проходит ток от начала Н1 — Н4 к концу К1 — К4, то полюсы сердечника статора приобретают полярность соответственно S и N .

При положении ротора, показанном на рис. 13.29, в зоне магнитного полюса N находится датчик ДХ1. При этом на выходе датчика появляется сигнал, при котором транзистор VT2 переходит в открытое состояние. В обмотке статора w_2 появляется ток i_2 , протекающий от Н2 к К2. При этом полюсы статора 2 и 4 приобретают полярность S и N . В результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора (постоянного магнита) возникает электромагнитный момент M , вращающий ротор. После поворота ротора относительно оси полюсов статора 1 — 3 на некоторый угол α против часовой стрелки датчик ДХ2 окажется в зоне магнитного полюса ротора S , при этом по сигналу с датчика ДХ2 включается транзистор VT3. В фазной катушке w_3 возникает ток i_3 и полюсы 3 и 1 приобретают полярность S и N . При этом магнитный поток статора Φ создается совместным действием МДС обмоток w_2 и w_3 . Вектор этого потока

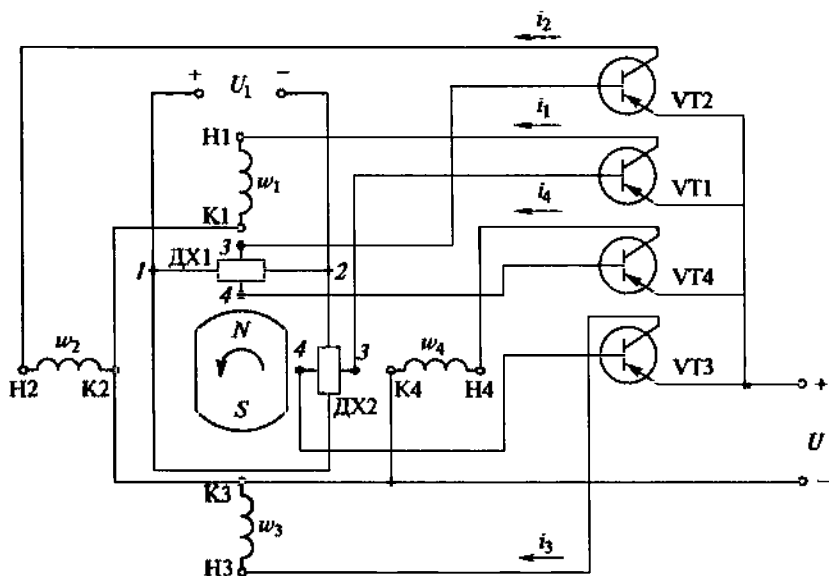
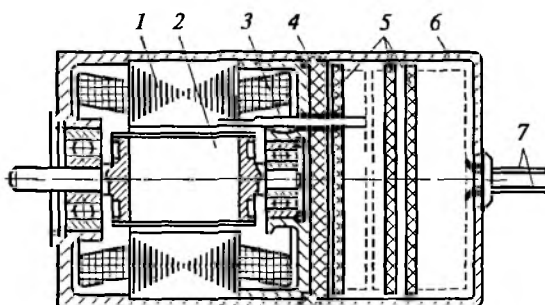


Рис. 13.29. Принципиальная схема бесконтактного двигателя постоянного тока небольшой мощности

Рис. 13.30. Устройство бесконтактного двигателя постоянного тока с четырехфазным статором:

1 — сердечник статора; 2 — постоянный магнит ротора; 3 — датчик Холла; 4 — перегородка; 5 — панели блока коммутатора; 6 — металлическая оболочка; 7 — выводы для подключения двигателя к сети



повернут относительно оси 2—4 на угол 45° . Ротор, продолжая вращение, занимает положение по оси полюсов статора 2—4. При этом датчик ДХ1 попадает в межполюсное пространство ротора, а датчик ДХ2 остается в зоне полюса S ротора. В результате транзис-

тор VT2 закрывается, а транзистор VT3 остается открытым и магнитный поток Φ , создаваемый МДС обмотки фазы w_3 , поворачивается относительно полюсов 2—4 еще на 45° и т.д.

На рис. 13.30 показано устройство БДПТ с четырехфазным статором.

ГЛАВА 14

СЕРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

14.1. Машины постоянного тока серии 2П

Машины этой серии изготавливают с высотами осей вращения от 90 до 315 мм при диапазоне мощностей от 0,37 до 200 кВт. По сравнению с машинами постоянного тока предшествующих серий машины серии 2П имеют повышенную перегрузочную способность и более широкий диапазон регулирования частоты вращения. Машины изготавливают как в качестве двигателей, так и генераторов.

Структура обозначения типоразмеров машин серии 2П:

<u>XX</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>
1	2	3	4	5	6

1 — название серии 2П, где 2 — номер серии;

2 — буква, указывающая на исполнение по способу защиты и вентиляции: Н — защищенное исполнение IP22 с самовентиляцией IC01, Ф — защищенное исполнение IP22 с независимой вентиляцией, Б — закрытое исполнение IP44 с естественным охлаждением, О — закрытое исполнение IP44 с самовентиляцией внешним обдувом;

3 — высота оси вращения, мм;

4 — условная длина сердечника якоря: М — средняя, Л — большая;

5 — буква Г при наличии встроенного тахогенератора, при отсутствии тахогенератора буква опускается;

6 — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150—69.

Условия эксплуатации машин серии 2П: высота над уровнем моря до

1000 м, температура окружающего воздуха от +5 до +40 °С, относительная влажность воздуха до 80 % при температуре +25 °С и при более низкой температуре без конденсации влаги; окружающая среда не пожаро- и взрывоопасная, не содержащая токопроводящей пыли, агрессивных газов и паров в концентрациях, разрушающих металлы и изоляцию.

14.1.1. Двигатели постоянного тока серии 2П

Двигатели изготавливают с независимым возбуждением. По требованию заказчика возможно смешанное возбуждение. Режим работы продолжительный S1. Технические данные двигателей приведены в табл. 14.1. Допускаются кратковременные перегрузки

по току при номинальном потоке возбуждения для двигателей типов:

2ПН, 2ПФ, 2ПО и 2ПБ — до $2I_{ном}$ в течение 60 с;

2ПН, 2ПФ и 2ПО — до $3I_{ном}$ в течение 10 с;

2ПБ — $4I_{ном}$ в течение 10 с.

При независимом возбуждении двигатели серии 2П реверсивные.

Частота вращения регулируется изменением подводимого к обмотке якоря напряжения и ослаблением потока возбуждения.

Двигатели защищенного исполнения с самовентиляцией 2ПН допускают работу с номинальным током якоря при снижении частоты вращения до $0,85n_{ном}$ в течение 1 ч.

Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей приведены в табл. 14.2 и на рис. 14.1—14.3.

Таблица 14.1. Технические данные двигателей серии 2П
с $h = 90—200$ мм

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	n_{max} , об/мин	$\eta_{ном}$, %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полюсов	возбуждения	
Тип 2ПН90МУХЛ4, 2ПН90МГУХЛ4								
0,17	110	750	3000	47,5	5,84	4,40	$\frac{610}{162}$	128
	220	750	1500	48,5	27,20	16,20	$\frac{610}{162}$	514
0,25	110	1060	4000	56,0	3,99	2,55	$\frac{610}{162}$	78,7
	220	1120	2000	57,0	15,47	11,20	$\frac{610}{162}$	297
0,37	110	1500	3000	61,5	2,52	1,47	$\frac{610}{162}$	48
	220	1500	2250	61,5	10,61	6,66	$\frac{610}{162}$	190
0,71	110	2360	4000	69,5	1,00	0,54	$\frac{470}{123}$	18
	220	2360	3540	70,0	3,99	2,55	$\frac{470}{123}$	79
1,00	110	3000	4000	71,5	0,60	0,35	$\frac{365}{92}$	12
	220	3000	4000	72,5	2,52	1,47	$\frac{365}{92}$	48
Тип 2ПН90ЛУХЛ4, 2ПН90ЛГУХЛ4								
0,20	110	750	3000	54,0	4,5	2,99	$\frac{555}{145}$	106
	220	800	1500	54,5	17,50	13,13	$\frac{555}{145}$	430
0,34	110	1060	4000	60,0	2,85	1,731	$\frac{555}{145}$	64,5
	220	1000	2000	60,0	12,20	7,960	$\frac{555}{145}$	264,0

Продолжение табл. 14.1

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	n_{max} , об/мин	$\eta_{ном}$, %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полюсов	возбуждения	
0,55	110	1500	4000	67,5	1,30	0,932	<u>432</u>	33
	220	1500	4300	67,5	5,44	3,890	<u>112</u>	132
0,90	110	2000	4000	73,0	0,644	0,400	<u>340</u>	14,6
	220	2120	4000	73,0	2,850	1,731	<u>87</u>	64,0
1,30	110	3150	4000	76,0	0,355	0,257	<u>340</u>	8,2
	220	3150	4000	78,0	1,300	0,932	<u>87</u>	33,0
Тип 2ПБ90МУХЛ4, 2ПБ90МГУХЛ4								
0,13	110	800	3000	49,5	7,48	4,79	<u>810</u>	173
	220	750	1500	47,5	34,00	20,37	<u>222</u>	694
0,18	110	1000	4000	54,5	5,41	3,47	<u>810</u>	122
	220	1000	2000	55,5	21,77	13,31	<u>222</u>	490
0,28	110	1600	4000	63,5	2,69	1,85	<u>810</u>	62
	220	1500	3000	63,5	11,70	7,35	<u>222</u>	267
0,40	110	2360	4000	69,5	1,46	0,87	<u>810</u>	34
	220	2200	4000	58,5	6,84	4,40	<u>222</u>	147
0,55	110	3000	4000	71,0	1,00	0,58	<u>810</u>	21
	220	3000	4000	71,0	3,99	2,55	<u>222</u>	82
Тип 2ПБ90ЛУХЛ4, 2ПБ90ЛГУХЛ4								
0,18	110	750	3000	53,0	5,44	3,89	<u>720</u>	150
	220	750	1500	53,0	23,55	15,00	<u>192</u>	610
0,25	110	1000	4000	58,5	4,01	2,30	<u>720</u>	96
	220	1120	2000	61,5	13,25	8,65	<u>192</u>	360
0,37	110	1500	4000	66,0	2,10	1,297	<u>720</u>	54
	220	1500	4300	67,5	7,74	5,170	<u>192</u>	199
0,53	110	2200	4000	72,0	1,13	0,687	<u>720</u>	28
	220	2240	4000	73,0	4,26	2,840	<u>192</u>	108
0,75	110	3000	4000	78,5	0,644	0,400	<u>720</u>	17
	220	3150	4000	77,0	2,280	1,609	<u>192</u>	63
Тип 2ПН100МУХЛ4, 2ПН100МГУХЛ4								
0,37	110	750	3000	60,0	2,69	1,62	<u>470</u>	89
	220	750	1500	59,5	11,78	6,70	<u>120</u>	343
0,50	110	1000	4000	65,0	1,79	0,93	<u>470</u>	53
	220	1000	2000	66,0	7,05	4,62	<u>120</u>	222
0,75	110	1500	4000	71,0	0,805	0,57	<u>359</u>	26
	220	1500	4300	71,5	3,400	2,05	<u>103</u>	104
1,20	110	2120	4000	75,0	0,436	0,355	<u>359</u>	14
	220	2200	4000	76,5	1,792	0,930	<u>103</u>	53

Продолжение табл. 14.1

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	n_{max} , об/мин	$\eta_{ном}$, %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полюсов	возбуждения	
2,00	110	3000	4000	78,5	0,201	0,135	<u>265</u>	6,6
	220	3000	4000	79,0	0,805	0,570	73	26,0
Тип 2ПН100ЛУХЛ4, 2ПН100ЛГУХЛ4								
0,42	110	750	3000	60,5	2,05	1,28	<u>397</u>	71
	220	750	1500	61,5	7,87	6,20	114	286
0,63	110	1000	4000	67,0	1,17	0,853	<u>397</u>	42,3
	220	1060	2000	67,0	4,92	3,520	114	169,0
1,10	110	1500	4000	72,5	0,52	0,51	<u>295</u>	21
	220	1500	4300	74,0	2,20	1,57	81	83
1,70	110	2200	4000	77,0	0,294	0,235	<u>295</u>	10,6
	220	2200	4000	78,0	1,170	0,853	81	42,0
2,20	110	3000	4000	79,5	0,16	0,146	<u>295</u>	5,7
	220	3150	4000	81,0	0,52	0,510	81	21,0
Тип 2ПБ100МУХЛ4, 2ПБ100МГУХЛ4								
0,26	110	750	3000	58,5	3,40	2,05	<u>595</u>	120
	220	800	1500	60,6	12,76	8,35	153	461
0,37	110	1000	4000	66,0	1,99	1,22	<u>595</u>	78
	220	1000	2000	65,5	8,49	5,14	153	313
0,60	110	1500	4000	72,0	1,083	0,659	<u>595</u>	40
	220	1600	3000	72,5	4,380	2,620	153	150
0,85	110	2300	4000	77,0	0,48	0,374	<u>595</u>	20
	220	2360	4000	78,0	1,99	1,220	153	78
1,20	110	3150	4000	79,0	0,331	0,192	<u>595</u>	11
	220	3150	4000	80,0	1,325	0,700	153	45
Тип 2ПН112МУХЛ4, 2ПН112МГУХЛ4								
0,60	110	800	3000	59,0	1,290	1,120	<u>233</u>	13,9
	220	800	2500	60,5	5,070	4,500	61,4	58,0
0,85	110	1060	4000	63,0	0,788	0,682	<u>233</u>	9,3
	220	950	3500	64,0	3,850	3,080	61,4	44,0
1,50	110	1500	4000	70,0	0,420	0,355	<u>181</u>	4,8
	220	1500	4000	70,0	1,770	1,550	44	19,5
2,50	110	2120	4000	76,0	0,196	1,134	<u>156</u>	2,3
	220	2200	4000	76,0	0,788	0,682	39,4	9,3
3,60	110	3150	4000	78,5	0,084	0,089	<u>129</u>	1,0
	220	3000	4000	79,0	0,420	0,356	33,6	4,8
Тип 2ПН112ЛУХЛ4, 2ПН112ЛГУХЛ4								
0,80	110	750	3000	62,5	0,968	0,848	<u>235</u>	13,9
	220	750	2500	63,5	3 680	3,420	57,5	52,5

Продолжение табл. 14.1

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	n_{max} , об/мин	$\eta_{ном}$, %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полюсов	возбуждения	
1,25	110	1060	4000	68,5	0,517	0,444	<u>202</u>	7,2
	220	1000	3500	68,0	2,340	2,040	52	34,0
2,20	110	1500	4000	74,5	0,242	0,195	<u>168</u>	3,5
	220	1500	4000	75,0	0,968	0,848	44	14,0
3,40	110	2240	4000	76,0	0,103	0,110	<u>125</u>	1,5
	220	2200	4000	78,0	0,413	0,411	33,5	6,2
5,30	110	3350	4000	79,5	0,460	0,051	<u>96,3</u>	1,5
	220	3000	4000	80,0	0,242	0,195	25,3	3,5
Тип 2ПБ112МУХЛ4, 2ПБ112МГУХЛ4								
0,34	110	800	3000	60,5	1,910	1,650	<u>403</u>	26
	220	750	2500	59,5	8,720	7,070	111	106
0,45	110	1060	4000	64,5	1,290	1,120	<u>403</u>	16
	220	1060	3500	66,0	5,070	4,500	111	66
0,75	110	1500	4000	70,0	0,565	0,565	<u>303</u>	7,4
	220	1500	4000	71,0	2,480	2,130	84,3	31
1,10	110	2240	4000	74,0	0,308	0,304	<u>303</u>	4
	220	2200	4000	75,0	1,290	1,120	84,3	16
1,40	110	3350	4000	78,5	0,196	0,134	<u>403</u>	2,7
	220	3000	4000	78,5	0,788	0,682	111	11
Тип 2ПБ112ЛУХЛ4, 2ПБ112ЛГУХЛ4								
0,50	110	800	3000	65,0	1,180	0,892	<u>303</u>	18
	220	800	2500	65,5	4,740	3,790	80	74
0,63	110	1000	4000	68,5	0,740	0,740	<u>303</u>	12
	220	1060	3500	68,5	3,130	3,160	80	50
1,00	110	1600	4000	74,0	0,378	0,378	<u>303</u>	5,9
	220	1500	4000	75,0	1,660	1,450	80	26
1,50	110	2240	4000	79,0	0,139	0,128	<u>303</u>	3
	220	2240	4000	80,0	0,740	0,740	80	12
2,00	110	3000	4000	81,0	0,103	0,110	<u>303</u>	1,8
	220	3150	4000	81,0	0,413	0,411	80	7,1
Тип 2ПН132МУХЛ4, 2ПН132МГУХЛ4								
1,6	110	750	3000	68,0	0,472	0,308	<u>134</u>	9,7
	220	750	2500	68,5	1,880	1,390	35	38,6
2,5	110	1000	4000	72,0	0,271	0,204	<u>134</u>	5,7
	220	1000	3000	73,5	1,080	0,763	<u>35</u>	22,9
	440	1000	2500	73,0	4,540	3,260		91,5
4,0	110	1500	4000	77,5	0,140	0,094	<u>134</u>	2,8
	220	1500	4000	79,0	0,564	0,336	<u>35</u>	11,0
	440	1500	3750	79,0	2,280	1,440		42,0

Продолжение табл. 14.1

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$ об/мин	$n_{пик}$ об/мин	$\eta_{ном}$, %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полусов	возбуж- дения	
7,0	110	2200	4000	81,0	0,067	0,049	$\frac{111}{25,6}$	1,4
	220	2240	4000	83,0	0,226	0,166		4,6
	440	2240	4000	83,0	0,906	0,692		18,0
10,5	220	3000	4000	84,0	0,140	0,094	$\frac{111}{25,6}$	2,8
	440	3000	4000	85,0	0,564	0,336		11,0
Тип 2ПН132ЛУХЛ4, 2ПН132ЛГУХЛ4								
1,9	110	750	3000	71,0	0,322	0,270	$\frac{138}{37,5}$	7,1
	220	750	2500	72,0	1,280	1,000		28,3
	440	750	1850	70,5	6,420	4,450		119,0
3,0	110	950	4000	74,5	0,220	0,196	$\frac{138}{37,5}$	4,5
	220	1000	4000	75,5	0,880	0,640		18,1
	440	1000	3750	76,5	3,380	2,160		68,0
5,5	110	1500	4000	80,0	0,080	0,066	$\frac{101}{27,8}$	1,8
	220	1500	4000	80,5	0,322	0,270		7,0
	440	1600	3750	81,0	1,280	1,000		28,0
8,5	220	2200	4000	84,0	0,167	0,124	$\frac{89}{25}$	3,5
	440	2240	4000	84,5	0,670	0,445		14,0
14,0	220	3150	4000	86,0	0,080	0,066	$\frac{76}{20,6}$	1,8
	440	3150	4000	86,5	0,322	0,270		7,0
Тип 2ПБ132МУХЛ4, 2ПБ132МГУХЛ4								
1,1	110	750	3000	64,0	0,564	0,336	$\frac{202}{54,5}$	13
	220	800	2500	67,0	2,440	1,530		55
	440	800	1850	66,5	10,450	6,480		227
1,6	110	1060	4000	71,0	0,346	0,224	$\frac{202}{54,5}$	7,9
	220	1000	3000	70,5	1,380	1,000		32,0
	440	1060	2500	71,5	5,920	3,680		132
2,4	110	1600	4000	76,5	0,185	0,148	$\frac{202}{54,5}$	4,2
	220	1600	4000	77,0	0,740	0,486		16,7
	440	1600	3750	76,5	2,850	1,640		62,0
3,7	110	2200	4000	79,5	0,104	0,059	$\frac{202}{54,5}$	2,4
	220	2360	4000	81,0	0,346	0,224		7,9
	440	2120	4000	80,5	1,380	1,000		32,0
4,5	110	3150	4000	81,0	0,046	0,029	$\frac{202}{54,5}$	1,0
	220	3150	4000	81,5	0,185	0,148		4,2
	440	3150	4000	82,0	0,740	0,486		16,7
Тип 2ПБ132ЛУХЛ4, 2ПБ132ЛГУХЛ4								
1,3	110	800	3000	73,0	0,412	0,296	$\frac{216}{50}$	9,8
	220	800	2500	72,0	1,980	1,380		43,0
	440	800	1850	73,5	7,050	4,860		163

Продолжение табл. 14.1

$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$n_{\text{тах}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полюсов	возбуждения	
1,9	110	1060	4000	76,0	0,269	0,220		6,5
	220	1060	3000	76,5	1,080	0,915	$\frac{216}{50}$	26,0
	440	1120	2500	78,0	4,050	2,820		99,0
3,2	110	1600	4000	82,0	0,120	0,089		2,9
	220	1600	4000	82,5	0,518	0,323	$\frac{216}{50}$	11,6
	440	1600	3750	82,5	2,020	1,670		46,0
4,5	110	2360	4000	84,0	0,055	0,039		1,3
	220	2200	4000	84,0	0,269	0,220	$\frac{189}{43}$	6,5
	440	2360	4000	85,0	0,880	0,640		21,0
5,3	220	3000	4000	85,5	0,167	0,124	$\frac{216}{50}$	4,0
	440	3150	4000	85,5	0,562	0,407		13,6
Тип 2ПО132МУХЛ4, 2ПО132МГУХЛ4								
1,3	110	800	3000	65,5	0,472	0,308		11
	220	800	2500	66,5	1,880	1,390	$\frac{175}{46,5}$	44
	440	800	1850	66,5	9,100	5,300		205
1,8	110	1000	4000	70,0	0,346	0,224	$\frac{175}{46,5}$	7,9
	220	1000	3000	64,5	1,380	1,000		32,0
2,8	110	1500	4000	75,5	0,140	0,094		4,2
	220	1500	4000	76,5	0,601	0,454	$\frac{175}{46,5}$	15,0
	440	1500	3750	77,0	2,530	1,580		49,0
4,5	110	2200	4000	80,5	0,067	0,049		1,6
	220	2240	4000	81,0	0,271	0,204	$\frac{175}{46,5}$	6,5
	440	2240	4000	81,0	1,080	0,763		26,0
5,5	220	3000	4000	83,0	0,185	0,148	$\frac{175}{46,5}$	4,2
	440	3000	4000	83,0	0,740	0,486		16,7
Тип 2ПО132ЛУХЛ4, 2ПО132ЛГУХЛ4								
1,6	110	800	3000	71,0	0,322	0,270		8,1
	220	750	2500	71,0	1,570	1,060	$\frac{138}{37,4}$	36,0
	440	750	1850	70,5	6,420	4,450		136
2,2	110	1000	4000	74,0	0,220	0,196		5,2
	220	1000	3000	75,5	0,880	0,640	$\frac{138}{37,4}$	21,0
	440	1000	2500	75,5	3,840	2,660		88,0
3,4	110	1500	4000	79,0	0,120	0,089		2,9
	220	1600	4000	81,0	0,412	0,296	$\frac{138}{37,4}$	9,8
	440	1500	3750	80,0	1,980	1,380		43,0
5,3	110	2200	4000	83,5	0,055	0,039		1,3
	220	2200	4000	83,5	0,220	0,196	$\frac{138}{37,4}$	5,2
	440	2240	4000	84,5	0,880	0,640		21,0
6,7	220	3000	4000	86,0	0,120	0,089	$\frac{138}{37,4}$	2,9
	440	3000	4000	86,5	0,518	0,323		11,6

Продолжение табл. 14.1

$P_{ном}, кВт$	$U_{ном}, В$	$n_{ном}, об/мин$	$n_{max}, об/мин$	$\eta_{ном}, \%$	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полюсов	возбуждения	
Тип 2ПФ132МУХЛ4, 2ПФ132МГУХЛ4								
2,0	110	750	3750	68,0	0,435	0,244	$\frac{134}{35}$	8,2
	220	750	2500	67,0	1,693	1,260		33,0
	440	800	1850	71,5	6,280	3,940		132
3,0	110	1060	4000	73,5	0,226	0,166	$\frac{134}{35}$	4,6
	220	1060	3000	74,0	0,906	0,692		18,5
	440	1060	2500	73,0	4,060	2,970		74,0
4,0	110	1500	4200	77,5	0,140	0,094	$\frac{111}{25,6}$	2,8
	220	1500	4200	80,5	0,472	0,308		9,7
	440	1500	3750	82,5	1,880	1,390		38,6
6,0	110	2200	4000	83,0	0,067	0,049	$\frac{175}{46}$	1,4
	220	2360	4000	83,5	0,226	0,166	$\frac{111}{25,6}$	1,6
	440	2360	4000	85,0	0,906	0,692		18,5
7,5	220	3000	4000	85,0	0,140	0,094	$\frac{111}{25,6}$	2,85
	440	3000	4000	85,0	0,546	0,336		11,0
Тип 2ПФ132ЛУХЛ4, 2ПФ132ЛГУХЛ4								
2,8	110	750	3750	66,5	0,269	0,220	$\frac{89}{25}$	5,7
	220	750	2500	67,0	1,080	0,915		23,0
	440	750	1850	69,0	4,050	2,920	$\frac{76}{20,6}$	86,0
4,2	110	950	4000	72,0	0,167	0,124	$\frac{76}{20,6}$	3,5
	220	1000	3000	73,0	0,670	0,445		14,0
	440	1000	2500	73,0	2,800	1,960		55,0
5,5	110	1500	4200	79,0	0,080	0,066	$\frac{76}{20,6}$	1,8
	220	1600	4200	80,5	0,269	0,220		5,7
	440	1600	3750	80,5	1,080	0,915		23,0
7,5	110	2200	4000	83,0	0,055	0,039	$\frac{167}{43}$	1,1
	220	2120	4000	83,5	0,167	0,124	$\frac{76}{20,6}$	3,5
	440	2200	4000	86,0	0,670	0,445		13,8
11,0	220	3000	4000	85,5	0,080	0,066	$\frac{76}{20,6}$	1,8
	440	3150	4000	86,5	0,322	0,270		7,1
Тип 2ПН160МУХЛ4, 2ПН160МГУХЛ4								
3,0	110	750	3000	75,5	0,138	0,135	$\frac{128}{34,3}$	5,04
	220	750	2500	76,5	0,732	0,485		20,2
	440	750	1850	76,0	3,150	2,210		85,0
4,5	110	950	4000	78,5	0,110	0,078	$\frac{108}{26,8}$	3,1
	220	1000	3000	79,5	0,411	0,304		10,5
	440	950	2500	79,0	1,780	1,440		48,8

Продолжение табл. 14.1

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$ об/мин	n_{max} об/мин	$\eta_{ном}$, %	Сопротивление обмотки при 15°C, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полусов	возбуж- дения	
7,5	110	1600	4000	83,0	0,037	0,024		1,0
	220	1500	4000	83,0	0,183	0,135	$\frac{82}{21,9}$	5,0
	440	1500	3750	84,0	0,732	0,485		20,0
13,0	220	2120	4000	85,5	0,081	0,056	$\frac{61,5}{16,4}$	2,2
	440	2360	4000	86,5	0,279	0,175		7,5
18,0	220	3150	4000	87,0	0,037	0,024	$\frac{53,1}{12,6}$	1,0
	440	3150	4000	87,5	0,145	0,101		4,0
Тип 2ПН160ЛУХЛ4, 2ПН160ЛГУХЛ4								
4,0	110	750	3000	77,5	0,130	0,102	$\frac{117}{32,8}$	4,25
	220	800	2500	78,5	0,486	0,389		14,7
	440	750	1850	78,5	2,020	1,800		63,0
6,3	110	1000	4000	80,5	0,069	0,049	$\frac{87,6}{23,6}$	2,2
	220	1000	3000	81,5	0,278	0,196		8,7
	440	1060	2500	82,0	0,485	0,842		31,0
11,0	220	1500	4000	85,5	0,096	0,073	$\frac{65,3}{17,7}$	3,1
	440	1600	3750	85,5	0,385	0,364		12,5
16,0	220	2360	4000	86,5	0,044	0,031	$\frac{49,4}{13,4}$	1,4
	440	2360	4000	87,5	0,171	0,131		5,5
24,0	220	3150	4000	88,0	0,024	0,017	$\frac{49,4}{13,4}$	0,8
	440	3150	4000	89,0	0,096	0,073		3,0
Тип 2ПБ160МУХЛ4, 2ПБ160МГУХЛ4								
2,1	110	800	3000	77,0	0,235	0,151	$\frac{177}{46,4}$	7,1
	220	750	2500	76,5	0,990	0,720		31,0
	440	800	1850	77,0	3,940	2,770		114,0
2,5	110	1000	4000	80,5	0,145	0,101	$\frac{177}{46,4}$	4,6
	220	1000	3000	80,0	0,590	0,430		18,0
	440	1120	2500	81,0	2,060	1,785		64,0
4,2	110	1500	4000	83,5	0,081	0,056	$\frac{177}{46,4}$	2,6
	220	1500	4000	84,5	0,326	0,208		10,0
	440	1600	3750	85,5	0,990	0,720	$\frac{201}{53}$	31,0
6,0	220	2120	4000	86,5	0,145	0,101	$\frac{177}{46,5}$	4,5
	440	2200	4000	87,0	0,590	0,430		18,0
7,1	220	3000	4000	85,5	0,081	0,056	$\frac{201}{53,1}$	2,6
	440	3000	4000	86,5	0,326	0,208		10,2
Тип 2ПБ160ЛУХЛ4, 2ПБ160ЛГУХЛ4								
2,5	110	750	3000	78,5	0,171	0,131	$\frac{181}{49,4}$	6,3
	220	800	2500	79,5	0,609	0,256		22,0
	440	800	2000	79,0	2,710	2,400		95,0

Продолжение табл. 14.1

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$ об/мин	$n_{тах}$ об/мин	$\eta_{ном}$, %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полюсов	возбуж- дения	
3,2	110	1060	4000	82,0	0,096	0,073		3,6
	220	1060	3000	82,5	0,385	0,364	$\frac{181}{49,4}$	14,0
	440	1060	2500	83,0	1,540	1,360		57,0
5,3	220	1500	4000	85,5	0,216	0,175	$\frac{181}{49,4}$	8,0
	440	1500	3750	86,5	0,816	0,600		29,0
7,5	220	2240	4000	88,0	0,096	0,073	$\frac{181}{49,4}$	3,6
	440	2240	4000	88,0	0,385	0,364		14,0
8,1	220	3350	4000	86,5	0,044	0,031	$\frac{181}{49,4}$	1,6
	440	3000	4000	88,0	0,216	0,175		8,0
Тип 2ПО160МУХЛ4, 2ПО160МГУХЛ4								
2,5	110	750	3000	75,0	0,235	0,151		7,1
	220	750	2500	76,5	0,836	0,647	$\frac{148}{40,7}$	26,0
	440	800	1850	77,5	3,150	2,210		97,0
3,2	110	1120	4000	80,5	0,110	0,078		3,5
	220	1000	3000	79,5	0,516	0,407	$\frac{148}{40,7}$	16,0
	440	1120	2500	81,0	1,780	1,440		56,0
6,0	220	1600	4000	84,5	0,235	0,151	$\frac{148}{40,7}$	7,1
	440	1500	3750	84,5	0,990	0,720		31,0
8,0	110	2240	4000	86,0	0,037	0,024	$\frac{201}{53}$	1,1
	220	2240	4000	86,5	0,145	0,101	$\frac{148}{40,7}$	4,6
	440	2200	4000	86,5	0,510	0,407		16,0
9,5	110	3000	4000	86,0	0,020	0,018	$\frac{201}{53}$	0,64
	220	3000	4000	87,5	0,081	0,056	$\frac{148}{40,7}$	2,6
	440	3000	4000	88,0	0,278	0,175		8,6
Тип 2ПО160ЛУХЛ4, 2ПО160ЛГУХЛ4								
3,2	110	750	3000	78,0	0,130	0,120		4,9
	220	750	2500	79,0	0,525	0,414	$\frac{117}{32,8}$	19,0
	440	750	1850	78,5	2,270	1,870		78,0
4,0	110	950	4000	80,5	0,096	0,073	$\frac{130}{32,7}$	3,6
	220	1000	3000	82,0	0,328	0,227	$\frac{117}{32,8}$	12,0
	440	1000	2500	82,0	1,310	1,450		48,0
7,1	110	1500	4000	85,0	0,044	0,031	$\frac{130}{32,7}$	1,6
	220	1500	4000	85,5	0,171	0,131		6,3
	440	1500	3750	86,0	0,609	0,526	$\frac{117}{32,8}$	22,0

Продолжение табл. 14.1

[illegible]

Продолжение табл. 14.1

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$ об/мин	n_{max} об/мин	$\eta_{ном}$, %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полюсов	возбуж- дения	
8,0	220	1060	3000	83,0	0,181	0,122	$\frac{74,8}{17,5}$	6,1
	440	1000	2500	82,0	0,902	0,540		27,0
	110	1500	3500	85,5	—	—	—	—
15,0	220	1500	4000	85,5	0,084	0,056	$\frac{55,5}{15}$	2,7
	440	1500	3500	86,0	0,338	0,221		11,0
26,0	220	2240	3500	88,0	0,038	0,025	$\frac{49,2}{12,8}$	1,2
	440	2240	3500	89,0	0,150	0,092		4,9
37,0	220	3000	3500	89,5	0,022	0,015	$\frac{55,5}{12,8}$	0,68
	440	3150	3500	79,5	0,084	0,056	$\frac{64}{12,8}$	2,7
Тип 2ПН180ЛУХЛ4, 2ПН180ЛГУХЛ4								
7,1	110	750	3000	80,0	0,065	0,044	$\frac{64}{17,3}$	2,25
	220	750	2500	80,5	0,260	0,183		9,0
	440	750	1800	82,5	1,060	0,670		36,0
10,0	110	1000	3500	82,5	0,042	0,030	$\frac{72,5}{20,1}$	1,4
	220	1000	3000	82,5	0,168	0,110		5,6
	440	1000	2500	83,5	0,585	0,482	$\frac{64}{17}$	20,0
18,5	220	1500	3500	87,0	0,065	0,044	$\frac{64}{17}$	2,2
	440	1600	3500	87,5	0,260	0,183		9,0
30,0	440	2200	3500	89,0	0,136	0,084	$\frac{46,7}{13}$	4,4
42,0	440	3000	3500	90,5	0,065	0,044	$\frac{46,7}{13}$	2,2
Тип 2ПБ180МУХЛ4, 2ПБ180МГУХЛ4								
3,4	110	800	3000	80,5	0,121	0,071	$\frac{150}{40,9}$	4,2
	220	800	2500	81,0	0,486	0,296		17,0
	440	800	1850	81,5	1,950	1,170		68,0
4,5	110	1000	3500	82,5	0,084	0,056	$\frac{177}{49,2}$	3,1
	220	1000	3000	83,5	0,338	0,221		12,5
	440	950	2500	84,0	1,500	0,825		54,0
7,1	110	1500	3500	86,0	0,038	0,025	$\frac{177}{49,2}$	1,4
	220	1500	3500	86,5	0,150	0,092		5,5
	440	1500	3500	86,0	0,688	0,482		25,0
9,5	110	2120	3500	87,0	0,022	0,015	$\frac{197}{49,2}$	0,78
	220	2200	3500	88,0	0,084	0,056		3,1
	440	2200	3500	88,5	0,338	0,221		12,0
12,0	220	3350	3500	87,5	0,038	0,025	$\frac{197}{49,2}$	1,4
	440	3000	3500	88,5	0,181	0,122		7,0

Продолжение табл. 14.1

Р _{ном} , кВт	U _{ном} , В	n _{ном} , об/мин	n _{max} , об/мин	η _{ном} , %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полюсов	возбуж- дения	
Тип 2ПБ180ЛУХЛ4, 2ПБ180ГУХЛ4								
4,2	110	750	3000	81,0	0,094	0,067	<u>131</u>	3,7
	220	750	2500	81,5	0,378	0,263	34,7	15,0
	440	750	1850	82,0	1,690	0,981		64,0
5,6	110	1000	3500	83,5	0,065	0,044	<u>152</u>	2,6
	220	1000	3000	84,0	0,260	0,183	40,2	10,2
	440	1000	2500	84,5	0,990	0,644	<u>131</u> 34	37,0
8,5	110	1600	3500	86,5	0,025	0,018	<u>131</u>	0,92
	220	1600	3500	87,5	0,094	0,067	34,7	3,7
	440	1500	3500	87,5	0,440	0,326		17,0
11,0	220	2200	3500	89,0	0,065	0,044	<u>174</u>	2,6
	440	2200	3500	89,5	0,260	0,183	40,2	10,2
Тип 2ПО180МУХЛ4, 2ПО180ГУХЛ4								
4,5	110	750	3000	79,0	0,121	0,071	<u>114</u>	4,2
	220	750	2500	79,5	0,486	0,292	30,2	17,0
	440	750	1850	80,0	1,950	1,170		68,0
6,3	110	1000	3500	82,0	0,058	0,037	<u>85,9</u>	2,2
	220	1000	3000	82,5	0,232	0,154	23,1	8,7
	440	1060	2500	83,5	0,902	0,540		31,0
10,0	110	1500	3500	85,5	0,038	0,025	<u>150</u>	1,4
	220	1500	3500	86,5	0,121	0,071	23,1	4,2
	440	1500	3500	88,5	0,486	0,296		17,0
14,0	220	2120	3500	89,0	0,058	0,037	<u>98</u>	2,2
	440	2120	3500	89,0	0,232	0,154	23,1	8,7
17,0	220	3000	3500	89,0	0,038	0,025	<u>132</u>	1,4
	440	3000	3500	90,0	0,150	0,092	35	5,6
Тип 2ПО180ЛУХЛ4, 2ПО180ГУХЛ4								
5,2	110	800	3000	80,5	0,065	0,044	<u>72,5</u>	2,6
	220	800	2500	81,5	0,260	0,183	20,1	10,3
	440	800	1850	82,0	1,060	0,670		41,0
7,5	110	1000	3500	83,0	0,042	0,030	<u>72,5</u>	1,6
	220	1000	3000	84,0	0,168	0,110	20,1	6,6
	440	1120	2500	84,5	0,585	0,462		23,0
16,0	220	2120	3500	89,0	0,042	0,030	<u>72,5</u>	1,6
	440	2120	3500	89,5	0,168	0,110	20,1	6,6
20,0	220	3000	3500	90,0	0,025	0,018	<u>98,5</u>	0,92
	440	3150	3500	81,0	0,094	0,067	26,6	3,70

Продолжение табл. 14.1

$P_{ном}, кВт$	$U_{ном}, В$	$n_{ном}$ об/мин	n_{max} об/мин	$\eta_{ном}, \%$	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полюсов	возбуж- дения	
Тип 2ПФ180МУХЛ4, 2ПО180МГУХЛ4								
9,0	110	800	3300	77,0	0,058	0,037	$\frac{41}{11}$	1,9
	220	750	2500	76,5	0,286	0,206	$\frac{49,2}{12,8}$	22
	440	750	1850	77,5	1,150	0,720	$\frac{49,2}{12,8}$	37
12,0	110	1060	3500	81,0	0,038	0,025	$\frac{49,2}{12,8}$	1,2
	220	1060	3300	82,0	0,150	0,092	$\frac{49,2}{12,8}$	4,9
	440	1000	2500	81,0	0,688	0,482	$\frac{49,2}{12,8}$	22,0
15,0	110	1500	3500	84,0	0,022	0,015	$\frac{49,2}{12,8}$	0,68
	220	1500	3500	85,5	0,084	0,056	$\frac{49,2}{12,8}$	2,70
	440	1500	3500	85,5	0,338	0,221	$\frac{49,2}{12,8}$	10,90
26,0	220	3150	3500	89,0	0,022	0,015	$\frac{49,2}{12,8}$	0,68
	440	3150	3500	89,5	0,084	0,056	$\frac{49,2}{12,8}$	2,70
Тип 2ПФ180ЛУХЛ4, 2ПО180ЛГУХЛ4								
10,0	110	750	3300	77,5	0,065	0,044	$\frac{72}{20}$	2,2
	220	750	2500	79,0	0,203	0,145	$\frac{46,7}{13}$	7,3
	440	750	1850	78,0	0,990	0,644	$\frac{46,7}{13}$	32,0
14,0	220	1000	3300	82,0	0,136	0,084	$\frac{46}{13}$	4,4
	440	1000	2500	83,0	0,585	0,462	$\frac{72}{20}$	20,0
18,5	220	1500	3500	87,0	0,065	0,044	$\frac{46,7}{13}$	2,2
	440	1500	3500	87,0	0,260	0,183	$\frac{46,7}{13}$	9,0
25,0	220	2120	3500	89,0	0,042	0,030	$\frac{86}{23}$	0,81
	440	2200	3500	89,5	0,136	0,084	$\frac{46}{13}$	4,4
32,0	440	3150	3500	90,5	0,065	0,044	$\frac{46,7}{13}$	2,2
Тип 2ПН200МУХЛ4, 2ПН200МГУХЛ4								
8,5	110	800	3000	81,0	0,047	0,029	$\frac{61,6}{17,1}$	1,59
	220	800	2500	82,0	0,188	0,116	$\frac{61,6}{17,1}$	6,4
	440	800	1850	82,0	0,796	0,506	$\frac{61,6}{17,1}$	25,5
13,0	110	1120	3500	84,0	0,026	0,016	$\frac{61,6}{17,1}$	0,9
	220	1120	3000	85,0	0,106	0,061	$\frac{61,6}{17,1}$	3,6
	440	1000	2500	84,5	0,485	0,303	$\frac{61,6}{17,1}$	16,8

Продолжение табл. 14.1

$P_{ном}, кВт$	$U_{ном}, В$	$n_{ном}, об/мин$	$n_{так}, об/мин$	$\eta_{ном}, \%$	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полюсов	возбуждения	
22,0	220	1500	3500	87,5	0,047	0,029	$\frac{53}{15}$	1,6
	440	1500	3500	87,5	0,246	0,130	$\frac{61}{17}$	8,1
36,0	220	2200	3500	88,5	0,026	0,016	$\frac{46}{13,1}$	0,9
	440	2200	3500	89,5	0,106	0,061	—	3,6
60,0	440	3150	3500	90,5	0,047	0,029	$\frac{35}{8,8}$	1,6
Тип 2ПН200ЛУХЛ4, 2ПН200ЛГУХЛ4								
11,0	110	800	3000	83,0	0,031	0,020	$\frac{55}{15,9}$	1,16
	220	800	2500	84,0	0,125	0,080	—	4,6
	440	750	1850	83,5	0,565	0,393	—	21,8
16,0	220	1000	3000	86,0	0,083	0,053	$\frac{55}{15,9}$	3,2
	440	1000	2500	86,0	0,343	0,224	—	12,9
30,0	220	1500	3500	88,9	0,031	0,020	$\frac{42}{10,6}$	1,15
	440	1600	3500	89,5	0,185	0,080	—	4,6
53,0	440	2360	3500	90,5	0,055	0,037	$\frac{31,7}{—}$	2,1
75,0	440	3150	3500	91,5	0,031	0,020	$\frac{31,7}{—}$	1,2
Тип 2ПБ200ЛУХЛ4, 2ПБ200ЛГУХЛ4								
6,0	110	800	3000	83,5	0,055	0,037	$\frac{137}{37,1}$	2,4
	220	800	2500	84,5	0,220	0,150	—	9,4
	440	800	1850	84,5	0,925	0,652	—	38,0
8,0	220	950	3000	87,5	0,125	0,080	$\frac{137}{37,1}$	5,3
	440	1060	2500	87,0	0,565	0,393	—	25,0
11,0	220	1500	3500	88,5	0,083	0,053	$\frac{180}{42}$	3,7
	440	1500	3500	89,0	0,286	0,168	$\frac{137}{37}$	12,0
15,0	220	2360	3500	89,5	0,031	0,020	$\frac{137}{37,1}$	1,3
	440	2360	3500	90,0	0,125	0,080	—	5,3
Тип 2ПО200МУХЛ4, 2ПО200МГУХЛ4								
6,0	110	750	3000	81,5	0,071	0,041	$\frac{96}{26,6}$	2,8
	220	750	2500	83,5	0,294	0,100	—	11,0
	440	750	1850	86,0	1,090	0,594	—	41,0
9,0	220	1060	3000	86,0	0,143	0,073	$\frac{96}{26,6}$	5,6
	440	1060	2500	86,0	0,570	0,325	—	22,0

Продолжение табл. 14.1

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	n_{max} , об/мин	$\eta_{ном}$, %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полюсов	возбуждения	
14,0	220	1500	3500	88,0	0,071	0,041	$\frac{96}{26,6}$	2,8
	440	1500	3500	88,0	0,294	0,172	$\frac{96}{26,6}$	11,0
20,0	220	2360	3500	89,5	0,026	0,016	$\frac{74}{8}$	1,0
	440	2200	3500	90,0	0,143	0,073	$\frac{96}{26}$	5,6
Тип 2ПО200ЛУХЛ4, 2ПО200ЛГУХЛ4								
7,1	110	750	3000	82,5	0,055	0,037	$\frac{102}{23,7}$	2,4
	220	750	2500	83,5	0,220	0,150	$\frac{102}{23,7}$	9,4
	440	750	1850	83,5	0,925	0,652	$\frac{102}{23,7}$	36,0
11,0	220	1000	3000	86,5	0,125	0,080	$\frac{102}{23,7}$	5,3
	440	1000	2500	87,0	0,500	0,264	$\frac{102}{23,7}$	21,0
17,0	220	1500	3500	89,0	0,055	0,037	$\frac{102}{23,7}$	2,4
	440	1500	3500	89,0	0,220	0,150	$\frac{102}{23,7}$	9,4
24,0	220	2360	3500	90,0	0,031	0,037	$\frac{102}{23,7}$	1,3
	440	2120	3500	90,5	0,125	0,150	$\frac{102}{23,7}$	5,3
Тип 2ПФ200МУХЛ4, 2ПФ200МГУХЛ4								
22,0	220	1600	3500	87,5	0,047	0,029	$\frac{46}{13,1}$	1,6
	440	1600	3500	88,0	0,188	0,116	$\frac{46}{13,1}$	6,4
30,0	440	2200	3500	90,0	0,106	0,061	$\frac{46}{13,1}$	3,6
40,0	440	3000	3500	90,5	0,071	0,041	$\frac{96}{22,8}$	2,5
Тип 2ПФ200ЛУХЛ4, 2ПФ200ЛГУХЛ4								
15,0	110	750	3000	82,0	0,031	0,020	$\frac{42}{10,6}$	1,2
	220	750	2500	82,5	0,125	0,080	$\frac{42}{10,6}$	4,6
	440	800	1850	83,5	0,500	0,264	$\frac{42}{10,6}$	18,6
20,0	220	1000	3300	85,5	0,083	0,053	$\frac{55}{15}$	3,2
	440	1000	2500	85,5	0,286	0,168	$\frac{31}{7}$	10,0
30,0	220	1500	3500	88,5	0,031	0,020	$\frac{31,7}{—}$	1,2
	440	1500	3500	88,5	0,125	0,080	$\frac{31,7}{—}$	4,6
42,0	440	2360	3500	90,5	0,055	0,037	$\frac{31,7}{—}$	2,1

Окончание табл. 14.1

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	n_{max} , об/мин	$\eta_{ном}$, %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
					якоря	добавочных полюсов	возбуждения	
55,0	440	3150	3500	91,0	0,031	0,020	$\frac{31,7}{-}$	1,2

Примечания: 1. Сопротивления обмотки возбуждения приведены в виде дроби: в числителе указаны значения при номинальном напряжении возбуждения 220 В, в знаменителе — при 110 В.

2. Индуктивность дана при номинальном токе возбуждения.

Таблица 14.2. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей типа 2ПН и 2ПБ с высотами оси вращения 90—200 мм (рис. 14.1—14.3)

Типоразмер	Размеры, мм					Масса, кг, при исполнении		Момент инерции, кг·м ²
	<i>b</i> ₁₀	<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₃₀	<i>l</i> ₁₀	<i>l</i> ₃₀	IM1001	IM3601	
2ПН90М 2ПБ90М	140	16	196	125	369	24	27	0,004
2ПН90МГ 2ПБ90МГ					493	29	32	
2ПН90Л 2ПБ90Л					349	27	30	0,005
2ПН90ЛГ 2ПБ90ЛГ					518	32	35	
2ПН100М 2ПБ100М	160	22	220	140	414	36	40	0,011
2ПН100МГ 2ПБ100МГ					538	41	45	
2ПН100Л					434	39	43	0,012
2ПН100ЛГ					558	44	48	
2ПН112М	190	24	237	159	490	47	51	0,015
2ПБ112М			218		640	52	56	
2ПН112МГ			237					
2ПБ112МГ			218					
2ПН112Л			237		530	56	60	0,018
2ПБ112Л			218		680	61	65	
2ПН112ЛГ			237					
2ПБ112ЛГ			218					

Окончание табл. 14.2

Типоразмер	Размеры, мм					Масса, кг, при исполнении		Момент инерции, кг·м ²
	b_{10}	d_1	d_{30}	l_{10}	h_0	IM1001	IM3601	
2ПН132М	216	38	277	162	610	86	95	0,038
2ПБ132М			258					
2ПН132МГ			277					
2ПБ132МГ			258					
2ПН132L			277		650	96	105	0,048
2ПБ132L			258					
2ПН132ЛГ			277					
2ПБ132ЛГ			258					
2ПН160М	254	38	333	149	645	141	146	0,083
2ПБ160М			314					
2ПН160МГ			333					
2ПБ160МГ			314					
2ПН160L			333		695	159	164	0,100
2ПБ160L			314					
2ПН160ЛГ			333					
2ПБ160ЛГ			314					
2ПН180М	279	42	373	190	765	213	221	0,200
2ПБ180М			354					
2ПН180МГ			373					
2ПБ180МГ			354					
2ПН180L			373		805	234	242	0,230
2ПБ180L			354					
2ПН180ЛГ			373					
2ПБ180ЛГ			354					
2ПН200М	318	48	413	190	785	282	287	0,250
2ПБ200М			394					
2ПН200МГ			413					
2ПБ200МГ			394					
2ПН200L			413		845	325	330	0,300
2ПБ200L			394					
2ПН200ЛГ			413					
2ПБ200ЛГ			394					

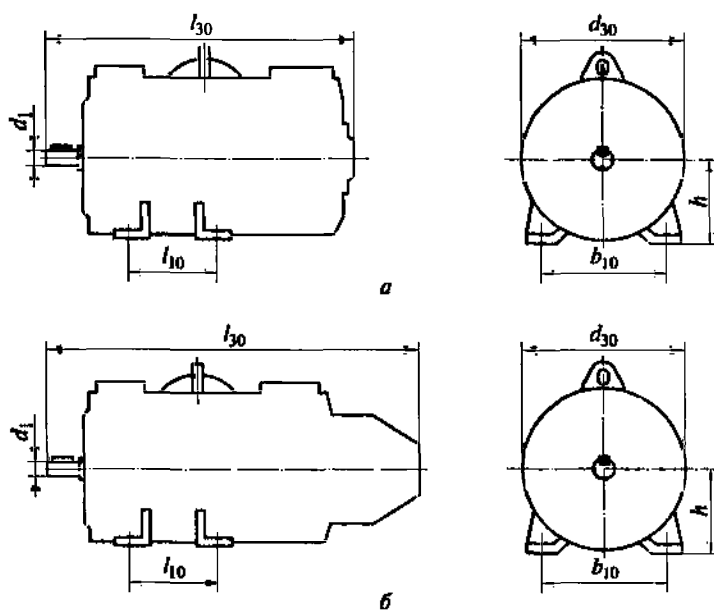


Рис. 14.1. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей типоразмеров 2ПН и 2ПБ исполнения по способу монтажа IM1001:

a — без тахогенератора; *б* — с тахогенератором

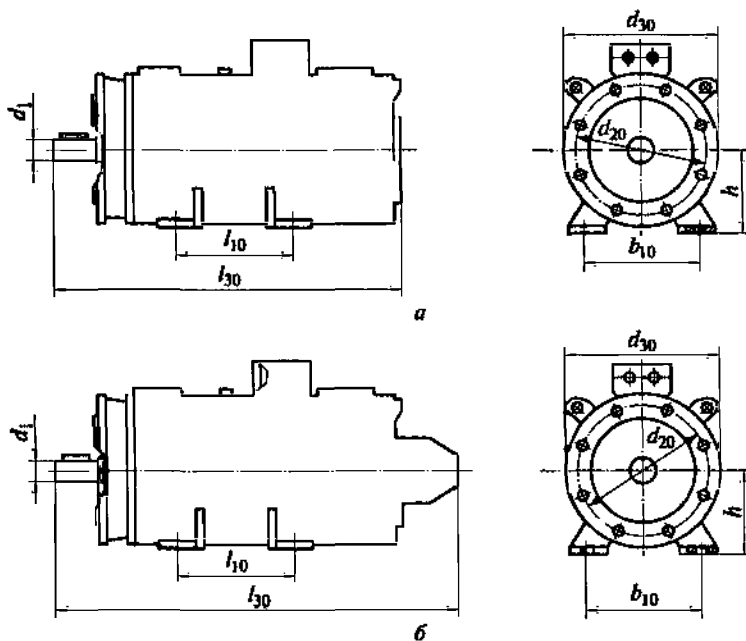


Рис. 14.2. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей типоразмеров 2ПН и 2ПБ исполнения по способу монтажа IM2001:

a — без тахогенератора; *б* — с тахогенератором

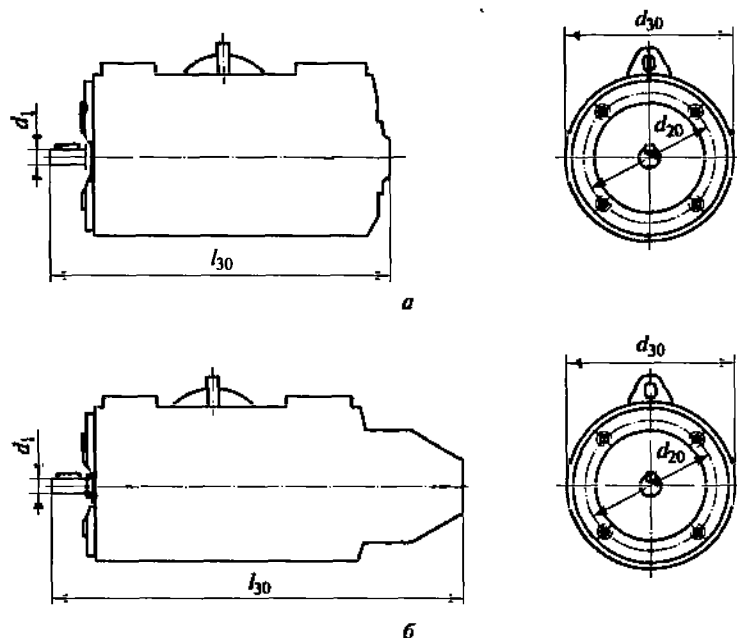


Рис. 14.3. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей типоразмеров 2ПН и 2ПБ исполнения по способу монтажа ИМ3001:

a — без тахогенератора; *б* — с тахогенератором

14.1.2. Генераторы постоянного тока серии 2П

Генераторы серии 2П изготавливают в защищенном исполнении IP22 с самовентиляцией IC01. Возбуждение генераторов независимое, параллельное или смешанное. При независимом возбуждении напряжение на обмотке возбуждения 110 или 220 В. Номинальное напряжение генераторов 115, 230 и 460 В, номинальная частота вращения 1000, 1500 и 3000 об/мин.

Генераторы с регулируемым напряжением можно применять для зарядки аккумуляторных батарей. Генераторы используют также для питания сетей постоянным током и в качестве возбудителей синхронных машин. В связи с развитием полупроводниковой выпрямительной техники приме-

нение генераторов постоянного тока ограничено.

Технические данные генераторов серии 2П с высотой оси вращения 100—160 мм приведены в табл. 14.3.

14.2. Двигатели постоянного тока серии 4П

Двигатели постоянного тока серии 4П являются результатом дальнейшего совершенствования двигателей серии 2П. Исходя из требований современного электропривода в новой серии машин постоянного тока применена более глубокая дифференциация двигателей по регулировочным свойствам, типу конструкции и условиям эксплуатации. В табл. 14.4 представлена структура двигателей серии 4П.

Таблица 14.3. Технические данные генераторов 2ПН с высотой оси вращения 100—160 мм

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %
2ПН100ЛУХЛ4	0,55	115	1500	63,3
		230	1500	63,3
	1,8	115	3000	78,5
		230	3000	78,5
2ПН112МУХЛ4	0,75	115	1500	64,5
		230	1500	63,5
	2,8	115	3000	76,6
		230	3000	76,5
2ПН112ЛУХЛ4	1,1	115	1500	67,0
		230	1500	69,5
	4,0	115	3000	80,5
		230	3000	80,5
2ПН132МУХЛ4	2,2	115	1500	73,5
		230	1500	75,0
		460	1500	75,5
	6,0	115	3000	82,0
		220	3000	83,5
2ПН132ЛУХЛ4	3,0	115	1500	77,0
		230	1500	79,0
		460	1500	78,0
	8,5	115	3000	83,5
		220	3000	85,0
2ПН160МУХЛ4	3,0	115	1000	75,6
		230	1000	76,0
	5,5	115	1500	81,5
		230	1500	81,5
		460	1500	81,0
	16,0	115	3000	84,5
		230	3000	86,5
2ПН160ЛУХЛ4	4,0	115	1000	78,5
		230	1000	78,5
	7,5	115	1500	82,0
		230	1500	81,0
		460	1500	84,5
	22,0	230	3000	87,5

Таблица 14.4. Структура двигателей серии 4П

Исполнение	Тип	Высота оси вращения, мм	Номинальный вращающий момент, Н · м	Способ охлаждения	Степень защиты
Закрытые обдуваемые с нормальным регулированием	4ПО	80	2,3 3,5 4,7	IC0141	IP44
		100	5,6 7,1 9,5		
		112	14,0 19,0		
		132	25,0 35,0		
		160	47,0		
Закрытые с естественным охлаждением	4ПБ	80	1,2 1,6 2,4	IC0041	IP44
		100	3,5 4,7 5,6		
		112	7,1 9,5		
		132	14,0 19,0		
		160	25,0 35,0		
Широкорегулируемые с принудительной вентиляцией	4ПФ	112	53 71	IC06 IC05	IP23
		132	95 118 140		
		160	190 236 280		
		180	355 475		
		200	560 710		
		225	850 1000		
		250	1250 1500	IC06	
		280	1700 2120		

Окончание табл. 14.4

Исполнение	Тип	Высота оси вращения, мм	Номинальный вращающий момент, Н·м	Способ охлаждения	Степень защиты
Крупные двигатели для тяжелых условий эксплуатации	4П	355	3000	IC01	IP23
			3750		
			4750		
		450	6000 9500 15 000		

Технические данные двигателей типа 4ПФ приведены в табл. 14.5; габаритные и установочно-присоединительные размеры — в табл. 14.6 и 14.7 и на рис. 14.4 и 14.5.

Широкорегулируемые двигатели типа 4ПФ предназначены для приводов механизмов станков с часовым программным управлением (ЧПУ) и других механизмов, требующих регу-

лировки частоты вращения в широком диапазоне. Двигатели имеют защищенное исполнение IP23 и независимое охлаждение IC06. Класс нагревостойкости изоляции F. Двигатели поставляют укомплектованными тахогенераторами и датчиками тепловой защиты. Возбуждение независимое с напряжением возбуждения 220 В (при последовательном соединении всех катушек

Таблица 14.5. Технические данные двигателей типа 4ПФ

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А	$\eta_{ном}$, %	$n_{ном}$, об/мин	n_{max} , об/мин
4ПФ112S	4,00	220	24,0	72,3	900	5000
	3,15		19,8	69,3	750	
	2,00		14,5	57,6	450	
4ПФ112M	4,25		26,4	68,0	730	5000
	3,00		20,1	60,3	475	
4ПФ112L	3,55		24,5	60,1	425	
4ПФ132S	15,00		85,4	77,9	1400	4500
	7,50		43,6	76,0	1000	
	6,00		32,7	74,0	875	
	4,25		26,9	65,0	580	
4ПФ132M	11,0		61,5	78,5	1060	
	8,5		48,6	76,0	875	
	8,0		47,3	68,0	600	
4ПФ132L	11,0		62,8	76,0	800	4000
	8,5		54,4	68,0	515	
4ПФ160S	15,0		79,6	80,7	850	
	11,0		66,2	70,5	530	4000
4ПФ160M	15,0		85,6	75,3	580	
4ПФ180	17,0		99,4	73,0	500	3800
4ПФ180M	20,0		114,5	75,0	475	

Продолжение табл. 14.5

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$I_{аном}$, А	$\eta_{ном}$, %	$n_{ном}$, об/мин	n_{max} , об/мин
4ПФ112S	7,50	440	19,2	87,1	2120	5000
	5,50		14,9	81,4	1450	
	4,25		12,6	74,0	975	
	3,14		9,9	69,0	730	
4ПФ112M	7,50		19,6	82,5	1450	
	5,50		16,6	74,1	900	
	4,25		13,3	67,4	690	
4ПФ112L	10,0		26,3	81,2	1320	4500
	7,5		21,5	81,0	975	
	5,5		17,0	70,8	690	
4ПФ132S	30,0		76,7	87,1	3070	
	18,5		47,8	85,0	2180	
	15,0		41,7	80,0	1400	
	5,5		15,7	73,0	800	
4ПФ132M	30,0		78,9	86,3	2300	5000
	22,0		59,3	83,0	1600	
	11,0		30,0	80,0	1090	
	8,5		24,8	75,0	800	
4ПФ132L	23,6		64,8	83,0	1400	4500
	15,0		40,8	81,0	1030	
	11,0		30,7	78,0	825	
4ПФ160S	30,0		78,6	84,0	1450	4500
	18,5		48,6	82,0	1090	
	15,0		42,5	76,1	730	
4ПФ160M	22,0		56,8	84,5	1090	
	18,5		49,6	80,8	775	
4ПФ160L	30,0		77,0	85,5	1030	
	22,0		58,7	81,3	775	
4ПФ180S	45,0		114	88,0	1450	4000
	37,0		95,7	85,0	1150	
	26,5		72,8	78,0	775	
4ПФ180M	45,0		115,6	86,0	1060	
	37,0		97,6	83,0	825	
4ПФ200M 4ПФ200L	55	440	144	84,9	1000	4000
	75		191	87,3	1060	4000
4ПФ225M 4ПФ225L	90		230	90,0	1000	4000
	110		282	87,0	1000	4000
4ПФ250M 4ПФ250L	132		336	87,0	1000	3500
	160		402	89,0	1000	3500
4ПФ200M	27		27	76,2	500	2500
	45		121	82,2	750	3600
	90		226	88,6	1500	3600

Окончание табл. 14.5

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$I_{аном}$, А	$\eta_{ном}$, %	$n_{ном}$, об/мин	n_{max} , об/мин
4ПФ200L	37	440	104	78,6	500	2500
	55		147	83,3	750	3600
	110		275	89,1	1500	3600
4ПФ225M	45		125	79,0	500	2500
	132		230	89,1	1500	3000
4ПФ225L	50		142	77,6	500	2500
	75		199	84,0	750	3000
	160		400	89,7	1500	3000
4ПФ250M	90		236	85,3	750	3000
	200		497	90,3	1500	3000
4ПФ250L	75		203	82,2	500	2500
	110		284	86,7	750	3000
	250		614	91,0	1500	3000

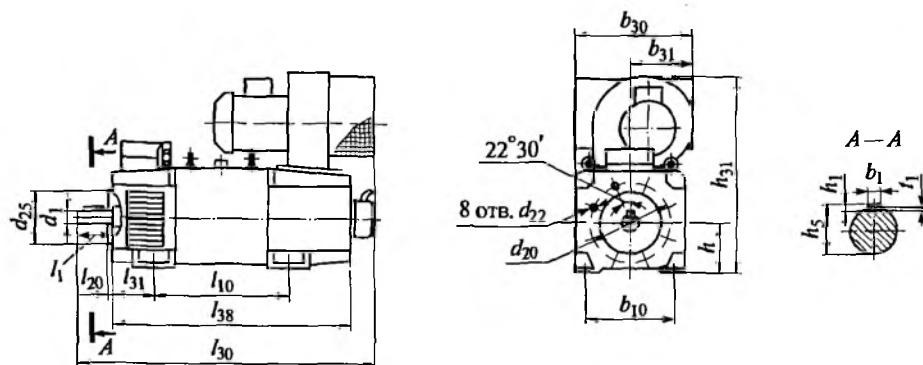


Рис. 14.4. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей типоразмеров 4ПФ с вентилятором, расположенным сверху на корпусе двигателя (см. табл. 14.6), исполнения по способу монтажа IM1001

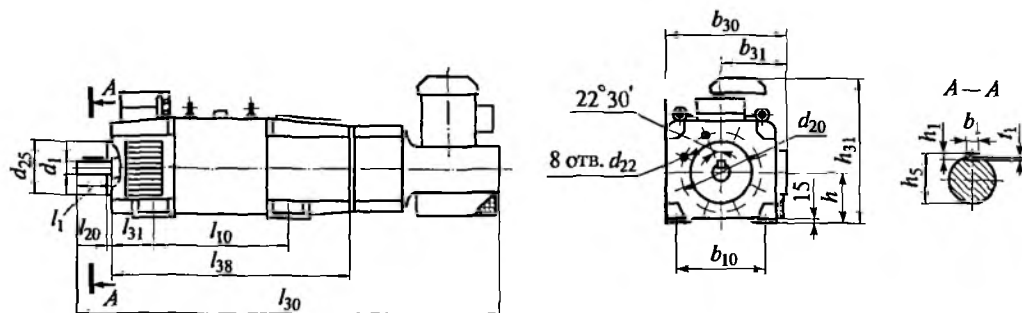


Рис. 14.5. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей типоразмеров 4ПФ с вентилятором, расположенным по оси двигателя (см. табл. 14.7), исполнения по способу монтажа IM1001

Таблица 14.6. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей типа 4ПФ с вентилятором, расположенным сверху на корпусе двигателя (рис. 14.4); исполнение по способу монтажа IM1001

Типоразмер	Размеры, мм																Момент инерции, 10 ⁻² кг·м ²	Масса, кг			
	i ₁	i ₁₀	i ₂₀	i ₃₀	i ₃₁	d ₁	d ₂₀	d ₂₂	d ₂₅	h	h ₁	h ₅	h ₃₁	t ₁							
4ПФ112SVXL4	280	665		460											4,7	90					
4ПФ112МУXL4	80	355	3,5	730	70	525	10	190	265	145	32	165	M10	130	112	8	35	430	5	5,6	102
4ПФ112ЛУXL4		400		790		585														6,3	119
4ПФ132SVXL4		315		790		553														9,5	132
4ПФ132МУXL4	110	355	4,0	850	89	613	12	216	300	160	42	215	15	180	132	8	45	500	5	11,6	159
4ПФ132ЛУXL4		450		920		683														13,5	186
4ПФ160SVXL4		355		860		612														25,0	239
4ПФ160МУXL4	110	400	4,0	930	108	682	14	254	390	220	48	265	15	230	160	9	51,5	618	5,5	29,0	275
4ПФ160ЛУXL4		450		970		722														32,5	297
4ПФ180SVXL4		450		1015		745	16	279	420	235	55	300	19	250	180	10	59	690	6	44,2	356
4ПФ180МУXL4	100	500	5,0	1095	121	825														57,8	410

**Таблица 14.8. Технические данные двигателей серии 4П
с высотами оси вращения 355 и 450 мм**

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$I_{ном}/I_{max}$, об/мин**	$\eta_{ном}$, %
4П-355-13-110-У3	110	440	400/1400	85,5
4П-355-23-110-У3			315/1200	84,1
4П-355-33-110-У3			250/1000	82,6
4П-355-43-110-У3			200/750	80,3
4П-355-13-132-У3	132	440*	450/2000	85,9
4П-355-23-132-У3			355/2000	84,6
4П-355-33-132-У3			280/1800	82,7
4П-355-43-132-У3			224/1500	80,9
4П-355-15-200-У3	200	440*	630/2000	89,0
4П-355-25-200-У3			500/2000	87,8
4П-355-35-200-У3			400/1800	86,9
4П-355-45-200-У3			315/1500	85,4
4П-355-15-250-У3	250	440	800/2000	90,8
4П-355-25-250-У3			630/2000	90,1
4П-355-35-250-У3			500/1800	89,2
4П-355-45-250-У3			400/1500	88,1
4П-355-15-355-У3	355	440*	1120/2000	92,2
4П-355-25-355-У3			900/2000	91,6
4П-355-35-355-У3			750/1800	91,2
4П-355-45-355-У3			600/1500	90,5
4П-450-16-500-У3	500	600	800/1800	92,8
4П-450-26-500-У3			500/1400	91,8
4П-450-36-500-У3			315/1000	90,1
4П-450-16-630-У3	630	600	1000/1800	93,8
4П-450-26-630-У3			630/1400	93,1
4П-450-36-630-У3			400/1000	91,7
4П-450-18-800-У3	800	600	1250/1800	94,4
4П-450-28-800-У3			800/1400	94,0
4П-450-38-800-У3			500/1000	93,1

* По согласованию с заказчиком возможно изготовление двигателей при напряжении 600 и 750 В.

** В числителе указана номинальная частота вращения, в знаменателе — максимальная.

возбуждения) или 110 В (при соединении катушек в две параллельные ветви). Вентилятор с независимым приводом располагается либо сверху на корпусе двигателя, либо по оси двигателя. В первом случае увеличивается высота двигателя (см. рис. 14.4), а во втором — его длина (см. рис. 14.5).

Двигатели постоянного тока типа 4П изготавливают с высотами оси вращения 355 и 450 мм. Они рассчитаны на тяжелые условия эксплуатации и предназначены для применения в электроприводах крупных станков и других механизмов с частыми пусками, остановками, реверсами, неравно-

мерной нагрузкой с резкими ее скачками. Двигатели допускают работу совместно с тиристорными управляющими устройствами при пульсациях выпрямленного тока до 7 %. Двигатели рассчитаны для эксплуатации в невзрывоопасной среде, не содержащей токопроводящей пыли в недопустимых пределах. Технические данные двигателей с высотами оси вращения 355 и 450 мм в продолжительном режиме работы S1 представлены в табл. 14.8. Возбуждение двигателей независимое при питании обмотки возбуждения напряжением 220 В, возможно переключе-

ние на напряжение 110 В, для чего в обмотке возбуждения сделаны дополнительные выводы.

Двигатели допускают перегрузку по току якоря при номинальной частоте вращения до $1,1I_{\text{ном}}$ в течение 2 ч; $1,5I_{\text{ном}}$ в течение 60 с и $2,25I_{\text{ном}}$ в течение 15 с.

Двигатели имеют исполнение по способу монтажа IM1003 или IM1004. Они снабжены тахогенераторами и реле скорости. В обозначении типоразмеров после высоты оси вращения указано количество щеток, расположенных на коллекторе.

Таблица 14.9. Технические данные универсальных коллекторных двигателей серии УВ

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, Вт	$I_{\text{ном}}$, А				$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	Момент инерции якоря, кг · см ²	Масса, кг
		постоянный		переменный					
		при напряжении, В							
		220	110	220	127				
$n_{\text{ном}} = 8000$ об/мин									
УВ02	10	0,13	0,26	0,14	0,25	36	0,94	0,05	0,30
УВ03	18	0,20	0,40	0,22	0,38	42	0,90	0,125	0,45
УВ041	30	0,28	0,55	0,31	0,54	50	0,88	0,375	0,85
УВ042	50	0,41	0,82	0,47	0,82	56	0,86	0,25	1,02
УВ051	80	0,61	1,20	0,71	1,30	60	0,85	0,40	1,75
УВ052	120	0,88	1,80	1,10	1,80	62	0,85	0,525	2,20
УВ061	180	1,30	2,60	1,60	2,70	63	0,85	0,75	3,00
УВ062	270	1,90	3,80	2,30	3,90	64	0,85	0,925	3,80
$n_{\text{ном}} = 5000$ об/мин									
УВ02	5	0,095	0,19	0,11	0,18	24	0,90	0,05	0,31
УВ03	10	0,14	0,28	0,17	0,29	32	0,86	0,125	0,45
УВ041	18	0,21	0,42	0,25	0,42	40	0,84	0,375	0,85
УВ042	30	0,30	0,60	0,36	0,63	46	0,82	0,25	1,02
УВ051	50	0,44	0,88	0,55	0,95	52	0,80	0,40	1,75
УВ052	80	0,63	1,30	0,80	1,40	58	0,79	0,525	2,20
УВ061	120	0,95	1,90	1,20	2,10	59	0,77	0,75	3,00
УВ062	180	1,4	2,80	1,80	3,00	61	0,77	0,925	3,80

14.3. Универсальные коллекторные двигатели серии УВ

Универсальные коллекторные двигатели с последовательным возбуждением серии УВ предназначены для привода различных устройств, механизмов и электроинструмента. Двигатели работают как от сети постоянного тока, так и от сети переменного тока частотой 50 Гц. Для того чтобы при любом способе питания мощность

двигателей оставалась одинаковой, обмотка возбуждения секционирована и имеет отпайки. При этом включение двигателя на постоянный и переменный ток производится на разных клеммах. Режим работы двигателей продолжительный S1. Климатические условия УХЛ и О, категория размещения 4. Исполнение по степени защиты IP10. В табл. 14.9 приведены технические данные двигателей. Исполнение по способу монтажа IM3681 и IM2181.

ГЛАВА 15

СЕРИИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

15.1. Двигатели постоянного тока металлургические и крановые серии Д

Двигатели постоянного тока металлургические и крановые серии Д предназначены для электропривода подъемно-транспортных механизмов и металлургических агрегатов в условиях повышенных значений влажности, температуры окружающей среды, запыленности и вибраций.

Двигатели характеризуются большими значениями вращающих моментов, высокой кратностью пусковых моментов и широким диапазоном регулирования частоты вращения.

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии Д:

Д	Х	Х
1	2	3

1 — обозначение серии;

2 — буква В для двигателей с вертикальным валом; для двигателей с горизонтальным валом буква опускается;

3 — условное обозначение габарита (двух- или трехзначное число; чем больше число, тем больше габарит двигателя).

Двигатели изготавливают в климатическом исполнении У, ХЛ и Т категории размещения 2 (на открытом воздухе или в помещении, где колебания температуры и влажности несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе, но отсутствует прямое воздействие солнечной радиации и атмосферных осадков). Высота над уровнем моря не более 1000 м.

По способу возбуждения двигатели серии Д подразделяют на двигатели с последовательным, параллельным, параллельным со стабилизирующей обмоткой и смешанным возбуждением (изготавливаются ограниченно).

Исполнение по способу монтажа — двигатели со станиной на лапах с горизонтальным валом. По заказу потребителей возможны другие способы исполнения.

Таблица 15.1. Технические данные двигателей серии Д закрытого исполнения с естественным охлаждением в кратковременном режиме 60 мин и защищенного исполнения с независимой вентиляцией в продолжительном режиме ПВ = 100%

Исполнение	Типоразмер	Возбуждение						Максимально допустимая частота вращения, об/мин	Маховой момент якоря, кгс·м ²	Количество охлаждающего воздуха, м ³ /мин	Статический напор, мм вод. ст.	Максимальный вращающий момент, кг·м, при возбуждении							
		Последовательное			Смешанное							Параллельное со стабилизирующей обмоткой и параллельное		последовательным	смешанном	параллельным со стабилизирующей обмоткой	параллельном		
		Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения обмотки, об/мин					Частота вращения обмотки, об/мин							
Тихоходное	Д12	2,5	16,0	1100	2,5	15	1175	2,5	14,6	1140	1180	3600	0,20	2,5	2,5	8,8	7,2	6,4	5,5
	Д21	4,5	28,0	900	4,5	27	1050	4,5	26,0	1000	1030	3600	0,50	3,5	17	19,5	14,6	13,0	11,5
	Д22	6,0	36,5	850	6,0	34	1050	6,0	33,0	1070	1100	3600	0,62	4,5	20	27,5	19,5	16,4	14,0
	Д31	8,0	46,5	800	8,0	44,5	870	8,0	44,0	820	840	3600	1,20	6,0	22	39	31,4	28,5	25,0
	Д32	12,0	69,0	675	12,0	66	780	12,0	65,0	740	770	3300	1,70	7,0	30	69	52,5	47,6	41,0
	Д41	16,0	89,0	650	16,0	86,5	700	16,0	86,0	670	690	3000	3,20	8,0	20	95	78,0	70,0	61,0
	Д806	22,0	120	575	22,0	116	650	22,0	116	635	650	2600	4,00	10,0	30	150	115	100	89,0
	Д808	37,0	200	525	37,0	192	575	37,0	192	565	575	2300	8,00	13,0	40	270	220	190	169
	Д810	55,0	290	500	—	—	—	55,0	280	540	550	2200	14,50	20,0	50	430	—	295	260
	Д812	75,0	390	475	—	—	—	75,0	380	500	515	1900	28,00	27,0	50	615	—	435	380
	Д814	110,0	565	460	—	—	—	110,0	550	490	500	1700	41,00	35,0	55	930	—	655	580
	Д816	150,0	760	450	—	—	—	150,0	740	470	480	1600	65,00	45,0	55	1300	—	930	820
	Д818	185,0	935	410	—	—	—	185,0	920	440	450	1500	110,00	50,0	55	1750	—	1230	1080

Исполнение	Типоразмер	Возбуждение										Максимальный вращающий момент, кг·м, при возбуждении							
		Последовательное		Смешанное		Параллельное со стабилизирующей обмоткой и параллельное		последовательном	смешанном	параллельном со стабилизирующей обмоткой	параллельном								
Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения со стабилизирующей обмоткой, об/мин	Частота вращения без стабилизирующей обмотки, об/мин	Максимально допускаемая частота вращения, об/мин	Маховой момент якоря, кгс·м ²	Количество охлаждающего воздуха, м ³ /мин	Статический напор, мм вод. ст.						
Д21	5,5	33	1200	5,5	31,5	1450	5,5	31,0	1400	1440	3600	0,50	3,5	17	18	13,0	11,5	10	
Д22	8,0	46	1200	8,0	44,0	1390	8,0	43,5	1450	1510	3600	0,62	4,5	30	26	19,5	16,0	14	
Д31	12,0	67	1100	12,0	65,0	1280	12,0	64,0	1310	1360	3600	1,20	6,0	22	42	32,0	26,0	23	
Д32	18,0	98	960	18,0	95,0	1100	18,0	94,0	1140	1190	3300	1,70	7,0	30	73	56,0	46,0	39	
Д41	24,0	130	970	24,0	125	1120	24,0	124	1060	1100	3000	3,20	8,0	20	96	73,0	66,0	57	
Д806	32,0	170	900	32,0	165	980	32,0	165	980	1000	2600	4,00	10,0	30	135	111	95,0	84	
Д808	47,0	250	720	47,0	240	800	47,0	240	770	800	2300	8,00	13,0	40	250	200	175,0	154	
Напряжение 440 В																			
Тихоходное																			
Д21	4,0	13,0	1050	4,0	12,5	1240	4,0	12	1200	1220	3600	0,50	3,5	17	11,8	8,8	7,8	6,9	
Д31	6,7	19,5	800	6,7	19,0	850	6,7	19	860	875	3600	1,20	6,0	22	26,0	21,5	18,0	16,0	
Д41	15,0	43,0	660	15,0	40,0	710	15,0	40	695	710	3000	3,20	8,0	20	71,0	58,0	50,0	44,5	
Д808	37,0	100	525	—	—	—	37,0	96	565	575	2300	8,00	13,0	40	220	—	150	135	
Д810	55,0	145	510	—	—	—	55,0	140	550	560	2200	14,50	20,0	50	335	—	230	205	
Д812	70,0	180	500	—	—	—	70,0	176	510	520	1900	28,00	27,0	50	435	—	320	280	
Д814	110,0	280	460	—	—	—	110,0	274	490	500	1700	41,00	35,0	55	745	—	525	460	
Д816	150,0	380	460	—	—	—	150,0	370	480	490	1600	65,00	45,0	55	1000	—	730	645	
Д818	185,0	467	410	—	—	—	185,0	460	440	450	1500	110,00	50,0	55	1400	—	980	865	

Быстро-ходное	Д22	7,0	20,5	1180	7,0	20	1420	7,0	19,5	1420	1460	3600	0,62	4,5	30	18,5	13,5	11,5	10
	Д32	17,0	47	970	17,0	45	1150	17,0	45	1150	1190	3300	1,70	7,0	30	54,5	40	34,5	30
	Д806	32,0	85	900	—	—	—	32,0	82	980	1000	2600	4,00	10,0	30	110	—	76	67

Примечание. Данные кратковременного режима 60 мин и продолжительного режима ПВ = 100 % являются номинальными.

Таблица 15.2. Технические данные двигателей серии Д закрытого исполнения с естественным охлаждением последовательного возбуждения в повторно-кратковременном и продолжительном режимах

Исполнение	Типоразмер	Последовательное возбуждение																		Максимальный вращающий момент, кг · м				
		Повторно-кратковременный режим																						
		ПВ = 15 %						ПВ = 25 %				ПВ = 40 %				ПВ = 60 %					ПВ = 100 %			
		Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин					
Напряжение 220 В																								
Тихоходное	Д12	3,4	24,5	800	3,0	19	960	2,4	15,0	1150	2,1	12,0	1300	1,4	7,5	1770	8,8							
	Д21	5,3	35,0	780	4,5	28	900	3,6	22,0	1040	3,1	18,5	1180	1,8	11,0	1630	19,5							
	Д22	7,0	44,0	770	6,0	36	850	4,8	28,0	970	4,2	23,5	1100	2,6	14,5	1520	27,5							
	Д31	10,0	62,0	690	8,5	50	770	6,8	38,5	900	5,6	32,0	1000	3,5	20,0	1330	39,0							
	Д32	14,5	85,0	600	12,0	68	675	9,5	53,0	760	8,5	46,0	810	4,7	26,0	1140	69,0							
	Д41	20,0	115	580	17,0	94	630	13,0	71,0	730	11,5	62,0	780	6,5	35,0	1050	95,0							
	Д806	26,5	147	530	22,0	118	580	17,0	92,0	640	14,0	73,0	700	8,5	45,5	880	145							
	Д808	39,0	210	505	32,0	170	560	24,0	125	615	19,0	100	700	11,5	62,0	900	270							
	Д810	60,0	320	490	49,0	255	520	35,0	182	610	29,0	150	620	17,0	90,0	760	430							

Окончание табл. 15.2

Исполнение	Типоразмер	Последовательное возбуждение															Максимальный вращающий момент, кг · м	
		Повторно-кратковременный режим																
		ПВ = 15 %					ПВ = 25 %			ПВ = 40 %			ПВ = 60 %			ПВ = 100 %		
		Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин		
Тихоходное	Д812	79	415	470	64	330	510	47	242	560	37	190	615	21,5	115	815	615	
	Д814	111	570	470	87	445	500	66	335	565	46	235	640	27,0	140	900	930	
	Д816	140	710	460	109	550	510	85	430	540	57	290	700	32,0	170	1000	1300	
	Д818	187	940	415	152	760	445	100	500	515	73	370	575	45,0	240	750	1750	
Быстроходное	Д21	6,6	41	1070	5,5	33	1200	4,4	26,0	1340	3,7	22,0	1520	2,0	13	2300	18	
	Д22	9,5	57	1080	8,0	46	1200	6,5	37,0	1300	5,5	30,5	1480	3,2	18	2100	26	
	Д31	14,5	83	980	12,0	67	1100	9,5	52,5	1190	8,0	44,0	1350	4,5	25	1750	42	
	Д32	21,0	116	920	17,0	92	1000	13,5	72,0	1100	11,0	58,0	1250	6,5	36	1600	73	
	Д41	28,0	155	890	23,0	124	970	18,0	96,0	1060	15,0	80,0	1170	9,0	48	1500	96	
	Д806	36,0	190	870	29,5	155	940	23,0	120	1010	19,5	105	1060	12,0	65	1280	135	
Д808	50,0	260	705	40,0	210	770	30,0	155	850	25,0	130	940	15,0	80	1150	250		
Напряжение 440 В																		
Тихоходное	Д21	4,7	16	900	4,0	13	1050	3,1	10,0	1230	2,6	8,6	1350	1,5	5,0	1800	11,8	
	Д31	8,2	26	700	7,0	21	770	5,2	16,0	900	4,3	13,5	970	2,5	8,5	1190	26,0	
	Д41	19,0	55	600	16,0	45	660	12,5	34,5	760	11,0	30,0	810	6,0	16,7	1090	71,0	
	Д808	39,0	105	505	32,0	85	560	24,0	63,0	615	19,0	50,0	700	11,5	31,0	900	220	
	Д810	60,0	160	490	49,0	127	520	35,0	91,0	610	29,0	75,0	620	17,0	45,0	760	335	
	Д812	76,0	200	475	62,0	160	515	45,0	115	590	35,0	90,0	625	20,5	55,0	825	435	

Типо- ходное	Д814	111	285	470	87	223	500	66	168	565	46	117	640	27	70	900	745
	Д316	140	355	460	109	275	510	85	215	540	57	145	700	32	85	1000	1000
	Д818	187	470	415	152	380	445	100	250	515	73	185	575	45	120	750	1400
Быстро- ходное	Д22	8,4	25,5	1050	7,0	20	1180	5,6	16,5	1300	4,5	13,6	1420	2,5	8	1900	18,5
	Д32	19,7	55,5	960	16,0	44	1050	12,6	34,0	1200	10,0	27,7	1320	5,7	17	1720	54,5
	Д806	36,0	95,0	870	29,5	77	940	23,0	60,0	1010	19,5	52,0	1060	12,0	32	1280	110

Таблица 15.3. Технические данные двигателей серии Д закрытого исполнения с естественным охлаждением параллельного возбуждения в повторно-кратковременном и продолжительном режимах

[illegible]

Быстроходное	Тихоходное		Исполнение		Возбуждение параллельное со стабилизирующей обмоткой и параллельное											
			Типоразмер		Повторно-кратковременный режим											
					ПВ = 15 %			ПВ = 25 %			ПВ = 40 %			ПВ = 60 %		
Д32	Д41	Д806	Д808	Д810	Д812	Д814	Д816	Д818	Д21	Д22	Д31	Д32	Д41	Д32	Д41	Д32
14,5	19,0	24,5	37,0	50,0	66,5	100	125	165	6,8	10,0	15,0	20,0	27,0	6,8	10,0	15,0
82	105	130	190	255	335	495	620	820	39	56	82	106	140	39	56	82
740	680	680	605	580	535	540	525	460	1370	1480	1320	1180	1090	1370	1480	1320
780	700	695	625	595	545	550	535	470	1420	1560	1390	1230	1160	1420	1560	1390
12,0	16,0	20,0	30,0	40,0	53,5	80,0	97,0	130	5,5	8,0	12,0	16,0	22,0	5,5	8,0	12,0
65	85	104	150	205	270	395	480	650	31	44	64	84	114	31	44	64
730	660	695	610	585	540	545	525	460	1360	1430	1300	1130	1060	1360	1430	1300
760	680	705	630	595	550	555	535	470	1400	1490	1350	1180	1110	1400	1490	1350
9,5	13	16	22	29	38	55	70	83	4,4	6,5	9,5	13,0	17,5	4,4	6,5	9,5
51,0	69,5	84,0	112	148	192	280	350	415	24,5	34,0	50,5	68,0	90,5	24,5	34,0	50,5
770	700	700	620	590	555	550	525	460	1460	1510	1360	1190	1120	1460	1510	1360
800	720	710	630	600	565	560	535	470	1500	1570	1420	1240	1160	1500	1570	1420
7,5	9,5	12,0	17,0	22,5	28,5	38,5	47,0	58,0	3,4	5,0	7,0	10,0	13,0	3,4	5,0	7,0
39	50	62	85	115	145	196	240	292	19	28	38	52	68	19	28	38
790	720	705	625	590	560	550	530	465	1500	1520	1410	1200	1130	1500	1520	1410
800	730	715	635	600	570	560	540	475	1520	1550	1440	1240	1170	1520	1550	1440
4,0	5,5	6,5	9,5	12,0	16,0	20,5	24,0	32,0	2,0	2,5	4,0	5,5	7,0	2,0	2,5	4,0
22	30	35	50	65	85	110	130	166	11,5	15,0	22,0	30,0	40,0	11,5	15,0	22,0
810	740	710	635	595	565	555	535	470	1550	1580	1450	1240	1150	1550	1580	1450
815	745	720	640	605	575	565	545	480	1570	1600	1480	1260	1170	1570	1600	1480
38	56	78	148	220	325	490	700	920	9,2	13,0	21,0	37,0	53,0	9,2	13,0	21,0
32,5	48,5	69,0	132	195	285	435	615	810	8,0	11,0	18,5	31,0	45,5	8,0	11,0	18,5

Быстро- ходное	Д806	33	170	1050	1060	27,5	140	1050	1060	21	110	1050	1060	15	80	1050	1060	8,5	47	1050	1060	74	65,5
	Д808	43	220	790	825	35,0	175	800	825	26	134	810	825	19	96	815	830	10,0	57	825	835	135	120
Напряжение 440 В																							
Тихоходное	Д21	4,7	15,0	1200	1220	4,0	12	1190	1210	3,1	9,5	1280	1300	2,5	7,5	1310	1320	1,2	4,1	1390	1395	6,2	5,5
	Д31	8,6	25,5	845	865	7,0	20	830	850	5,2	14,5	890	910	4,3	12,5	900	910	2,2	7,2	935	840	14,5	13,0
	Д41	18,0	49,5	685	700	15,0	40	670	680	12,5	34,0	710	720	9,0	23,5	725	730	5,0	14,0	740	745	40,0	35,5
	Д908	37,0	95,0	605	625	30,0	75	610	630	22,0	56,0	620	630	17,0	42,5	625	635	9,5	25,0	635	640	115	105
	Д810	50,0	127	580	595	40,0	102	585	595	29,0	74,0	590	600	22,5	57,0	590	600	12,0	32,5	595	605	175	154
	Д812	63,0	160	540	550	51,0	130	545	555	36,0	92,0	560	570	27,0	69,5	565	575	15,0	41,0	570	580	240	210
	Д814	100	246	540	550	80,0	196	545	555	55,0	138	550	560	38,5	98,0	500	560	20,5	55,0	555	565	395	345
	Д816	125	310	525	535	97,0	240	525	535	70,0	175	530	540	47,0	120	530	540	24,0	65,0	535	545	550	485
	Д818	165	410	460	470	130	325	460	470	83,0	205	460	470	58,0	146	465	475	32,0	83,0	470	480	735	650
	Быстро- ходное	Д22	9,0	25,0	1480	1530	7,0	19,5	1420	1460	5,6	15,5	1510	1550	4,0	12,0	1520	1540	2,0	6,5	1580	1590	9,2
Д32		19,0	50,5	1200	1250	15,0	40,0	1160	1200	12,0	31,5	1200	1240	9,0	24,5	1240	1260	5,0	14,5	1270	1280	27,5	24,0
Д806		33,0	85,0	1050	1060	27,5	70,0	1050	1060	21,0	55,0	1050	1060	15,0	40,0	1050	1060	8,5	23,5	1050	1060	69,0	52,0

* Максимальные моменты двигателей приведены при предельно нагретых обмотках параллельного возбуждения.

Таблица 15.4. Технические данные двигателей серии Д закрытого исполнения с естественным охлаждением смешанного возбуждения в повторно-кратковременном и продолжительном режимах

Исполнение	Типоразмер	Смешанное возбуждение															Максимальный вращающий момент*, кг·м
		Повторно-кратковременный режим															
		Продолжительный режим															
		Напряжение 220 В															
		ПВ = 15 %			ПВ = 25 %			ПВ = 40 %			ПВ = 60 %			ПВ = 100 %			
		Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	
Тихоходное	Д12	3,6	22,5	1040	3,0	17,5	1160	2,4	14	1230	2,0	11,2	1330	1,2	6,5	1460	7,0
	Д21	5,5	34,5	1000	4,5	27,0	1080	3,6	21	1140	2,9	17	1210	1,7	10,0	1400	14,2
	Д22	7,0	41,0	1000	6,0	34,0	1050	4,8	27	1120	3,9	22	1150	2,2	12,5	1250	18,9
	Д31	10,5	61,0	810	8,5	48,0	860	6,8	37	910	5,5	29	960	3,2	17,0	1040	30,5
	Д32	15,0	84,0	740	12,0	66,0	800	9,5	51	840	7,7	41	880	4,5	24,0	930	51,0
	Д41	20,0	112	700	16,0	87,0	720	13,0	70	740	10,0	52	770	6,0	32,0	800	75,5
	Д806	26,0	140	650	21,0	110	675	17,0	88	730	11,5	60	750	7,5	40,0	775	111
	Д808	39,0	200	600	31,0	160	625	24,0	124	650	19,0	100	670	11,0	60,0	690	214
Быстроходное	Д21	6,8	39	1390	5,5	31,5	1470	4,4	25	1550	3,6	20	1630	2,1	12	1750	12,6
	Д22	10,0	56	1330	8,0	45,0	1400	6,5	36	1475	5,0	28	1560	3,0	17	1680	18,8
	Д31	14,5	80	1250	12,0	65,0	1310	9,5	51	1360	7,5	41	1430	4,0	24	1520	31,0
	Д32	20,0	108	1070	16,0	85,0	1140	13,0	66	1200	10,0	55	1230	6,0	32	1310	54,5
	Д41	29,0	151	1080	23,0	120	1120	18,0	95	1160	14,5	75	1190	8,5	45	1240	71,0
	Д806	35,0	182	980	29,0	150	1020	23,0	118	1060	17,5	91	1100	10,0	55	1160	108
	Д808	49,0	250	815	43,5	222	830	30,0	152	860	22,0	115	880	13,0	70	900	194

Напряжение 440 В													
Д21	Д31	Д41	Д808	Д22	Д32	Д806	Д21	Д31	Д41	Д808	Д22	Д32	Д806
4,9	8,5	20,0	—	8,7	18,5	—	16	26	56	—	25	54	—
1140	800	700	—	1380	1130	—	4,0	7,0	16,0	—	7,0	15,0	—
1240	850	720	—	1450	1200	—	3,2	5,3	13,0	—	5,5	11,5	—
10,0	15,5	35,0	—	16	33	—	1310	900	740	—	1530	1260	—
2,5	4,3	10,6	—	4,3	9,0	—	8,0	12,5	28,0	—	12,5	26,0	—
1100	940	760	—	1600	1310	—	1,3	2,4	6,0	—	2,3	4,5	—
4,5	7,5	16,5	—	7,6	15,0	—	1610	1000	800	—	1730	1390	—
8,5	20,9	56,0	—	13,1	38,8	—	—	—	—	—	—	—	—

* Максимальные моменты двигателей приведены при предельно нагретых обмотках параллельного возбуждения.

Таблица 15.5. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей типов Д12—Д808, исполнение на лапах с горизонтальным валом (см. рис. 15.1)

Типоразмер	Размеры, мм												Форма конца вала	Масса, кг
	b_{10}	b_{11}	b_{31}	b_{32}	d_{30}	h	h_{30}	h_1	h_2	h_0	h_{11}	h_{30}		
Д12	280	330	185	160	330	160	315	60	—	220	280	561	Цилиндрическая	130
Д21	300	350	215	185	384	180	365	80	—	194	244	665	То же	200
Д22	300	350	215	185	384	180	365	80	—	239	289	710	»	225
Д31	390	460	250	225	452	225	445	110	—	250	310	752	»	310
Д32	390	460	250	225	452	225	445	110	—	320	380	822	»	365
Д41	430	530	305	255	510	250	500	105	70	299	379	910	Коническая	540
Д806	420	508	305	255	510	250	500	105	70	533	613	930	То же	635
Д808	476	560	335	285	570	280	560	130	90	628	710	1047	»	885

Таблица 15.6. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей типоразмеров Д810—Д818; исполнение на лапах с горизонтальным валом (см. рис. 15.2)

Типоразмер	Размеры, мм											Масса, кг
	b_{10}	b_{11}	b_{32}	d_{34}	h	h_{31}	l_1	l_3	l_{10}	l_{30}	l_{33}	
Д810	520	623	320	400	315	635	130	90	660	1114	1276	1250
Д812	570	690	350	435	340	690	165	120	724	1220	1398	1770
Д814	636	762	385	470	375	762	165	120	813	1362	1543	2240
Д816	686	826	410	495	400	810	200	150	890	1502	1714	2860
Д818	760	915	460	560	450	910	200	150	990	1579	1792	3745

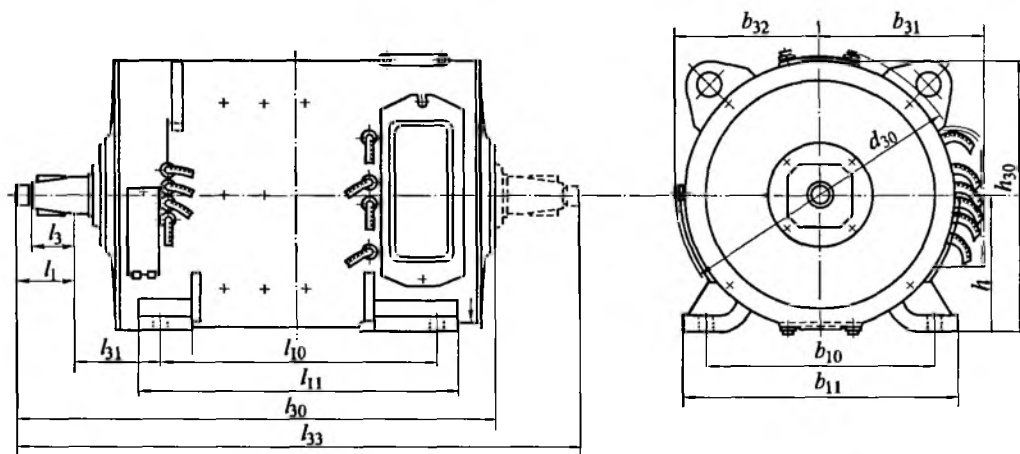


Рис. 15.1. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей типоразмеров Д12—Д808 исполнения на лапах с горизонтальным валом (см. табл. 15.5)

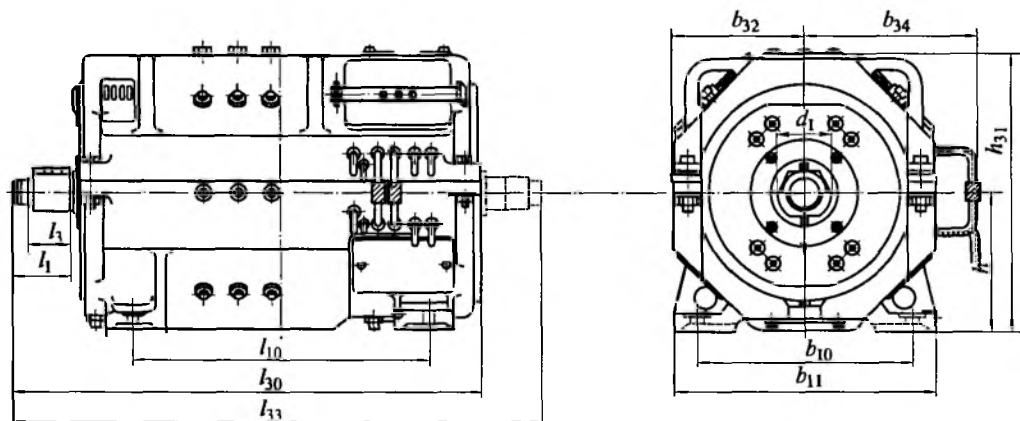


Рис. 15.2. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей типоразмеров Д810—Д818 исполнения на лапах с горизонтальным валом (см. табл. 15.6)

По способу защиты от внешних воздействий двигатели могут иметь защищенное или закрытое исполнение. Класс нагревостойкости изоляции Н.

По способам охлаждения двигатели могут быть с естественным охлаждением и с независимой вентиляцией (для тропического исполнения).

Напряжение питания постоянным током 220 и 440 В.

Основные технические данные двигателей серии Д приведены в табл. 15.1 — 15.4. Габаритные и установочно-присоединительные размеры представлены на рис. 15.1 и 15.2 и в табл. 15.5 и 15.6.

Двигатели серии Д могут эксплуатироваться в режимах: продолжительном S1 (ПВ = 100 %), кратковременном и повторно-кратковременном S3 при ПВ, равном 15, 25, 40 и 60 %.

Ток двигателя закрытого исполнения с естественным охлаждением в кратковременном режиме 30 мин составляет 120 % тока кратковременно-го режима 60 мин.

Номинальное значение тока двигателя серии Д защищенного исполнения с независимой вентиляцией в повторно-кратковременном режиме составляет: при ПВ = 60 % около 125 %, при ПВ = 40 % около 150 % тока продолжительного режима (ПВ = 100 %), указанного в табл. 15.1.

При расчете характеристик двигателей серии Д последовательного возбуждения можно воспользоваться естественными универсальными характеристиками, построенными в относительных единицах (см. рис. 13.18).

Рабочие характеристики двигателей для всех видов возбуждения всех типоразмеров приводятся в каталоге на двигатели серии Д.

По коммутации двигатели допускают перегрузку, соответствующую мак-

симальным моментам при номинальном напряжении (см. табл. 15.1).

Параллельные обмотки возбуждения состоят из двух секций. При напряжении возбуждения 110 В эти секции включаются параллельно; при напряжении 220 В — последовательно; при напряжении 440 В — последовательно с последовательно включенным резистором.

Двигатели допускают питание через регулируемые статические выпрямители.

Увеличение частоты вращения допускается путем уменьшения тока в параллельной обмотке возбуждения:

а) для двигателей параллельного возбуждения и параллельного возбуждения со стабилизирующей обмоткой — в 2 раза;

б) для тихоходных двигателей параллельного возбуждения со стабилизирующей обмоткой — в 2,5 раза.

При указанных повышенных частотах вращения допускается момент нагрузки до $0,8M_{\text{ном}}$ для двигателей на напряжение 220 В и до $0,64M_{\text{ном}}$ для двигателей на напряжение 440 В.

Двигатели последовательного и смешанного способов возбуждения позволяют увеличить номинальную частоту вращения в 2 раза.

Двигатели допускают питание через регулируемые статические выпрямители.

15.2. Двигатели постоянного тока главного привода прокатных станов серии МП

Технологическим процессом прокатки на реверсивных прокатных станах определены особенности работы двигателя главного привода:

1) большая частота включений — 1000 вкл/ч и более;

2) широкий диапазон регулирования частоты вращения (не менее 10:1);

3) перегрузка по току и моменту при малой продолжительности (до $2,25 I_{\text{ном}}$ в течение 15 с);

4) кратковременность переходных процессов, что обеспечивается, в частности, небольшим моментом инерции якоря двигателя.

Всем этим требованиям в достаточной степени соответствуют двигатели постоянного тока.

Для питания мощных двигателей постоянного тока в настоящее время применяют управляемые тиристорные преобразователи (см. 16.2), которые, наряду с целым комплексом достоинств, обладают недостатком — пульсацией выходного напряжения и тока, ухудшающей коммутацию и вызывающей дополнительные потери, а также появление пиков напряжений, предъявляющих к изоляции обмоток двигателя повышенные требования. Для ослабления нежелательных последствий применяют ряд мер, например, станину двигателей делают шихтованной из листов электротехнической стали.

Магнитопровод двигателей разъемный по горизонтали. Листы магнитопровода запрессованы в стальной сварной корпус.

В двигателях используют подшипники скольжения с комбинированной смазкой (кольцевой и принудительной проточной). Двигатели монтируют на стальных фундаментных плитах. Вентиляция двигателей принудительная по замкнутому или разомкнутому циклу с применением воздухоохладителей.

Стремление уменьшить момент инерции главного привода привело к

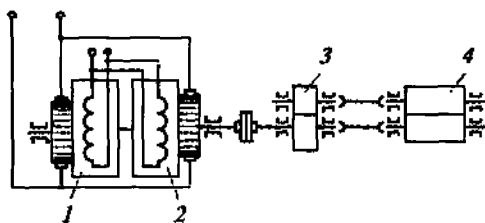


Рис. 15.3. Главный привод прокатного стана с двухъякорным двигателем:

1, 2 — якоря двухъякорного двигателя;
3 — рабочая клетка стана; 4 — рабочие валки

созданию двухъякорных двигателей с двумя якорными обмотками и двумя коллекторами (рис. 15.3). Такой двигатель имеет меньший диаметр якорей, а следовательно, меньший динамический момент инерции по сравнению с одноякорным двигателем той же мощности. Однако длина двухъякорного двигателя больше, чем одноякорного, поэтому он менее надежен в эксплуатации и менее удобен при размещении его в машинном зале.

В табл. 15.7 приведены технические данные двигателей постоянного тока серии МП, а на рис. 15.4 и в табл. 15.8 приведены габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей.

Структура обозначения двигателей серии МП:

МП	Х	Х	Х
1	2	3	4

- 1 — серия МП;
- 2 — мощность, кВт;
- 3 — частота вращения, об/мин;
- 4 — климатическое исполнение и категория размещения.

Условия эксплуатации двигателей:
высота над уровнем моря не более 1000 м; температура охлаждающего воздуха, °С: от +1 до +40 при исполнении УХЛ4, от +1 до +45 при исполнении О4.

Таблица 15.7. Основные технические данные двигателей серии МП

Типоразмер	$P_{\text{ном}},$ кВт	$U_{\text{ном}},$ В	$I_{\text{ном}},$ А	$n_{\text{ном}},$ об/мин	$M_{\text{ном}},$ кН·м	Динамический момент инер- ции, 10^3 кг·м ²	Масса, 10^3 кг	$\eta_{\text{ном}},$ %
МП6300-40	6300	930	7370	40/80	1504	85	195	91,9
МП9000-63	9000	750	8960	50/80	1719	60	208	93,7
МП12500-63	12500	930	14150	63/90	1895	125	230	95,0
2МП11200-300	2×5600	930	2×6325	300/500	$2 \times 178,3$	27,5	116	95,2
2МП14200-125	2×7100	930	2×8000	125/250	2×542	95,0	232	95,4
2МП14200-50	2×6300	930	2×7280	50/100	2×1203	212,5	316	92,8

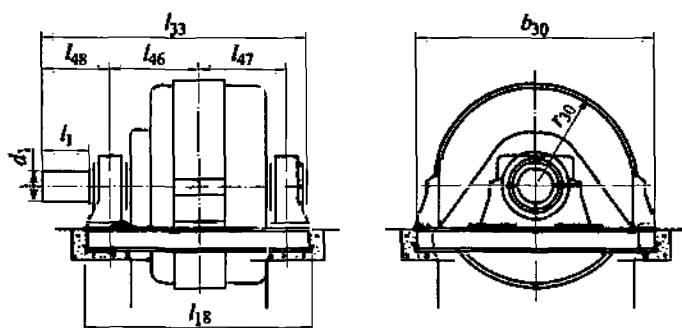


Рис. 15.4. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателя серии МП (см. табл. 15.8)

Таблица 15.8. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей серии МП (см. рис. 15.4)

Типоразмер	Размеры, мм								
	b_{30}	d_1	h	l_{18}	l_{33}	l_{46}	l_{47}	l_{48}	r_{30}
МП6300-40	5500	830	950	5800	7295	2200	2350	1650	—
МП9000-63	4900	800	300	6250	8740	—	—	—	2225
МП12500-63	5950	860	870	6200	7000	—	—	—	2790
2МП11200-300	4300	500	540	6100	—	2565	2525	1120	—
2МП14200-125	4900	780	850	7550	8945	3150	3150	1550	—
2МП14200-50	5800	930	1100	7600	8910	2050	1950	1910	—

Охлаждающий воздух не должен содержать химически агрессивных и токопроводящих примесей. Окружающая среда должна быть невзрывоопасной, не содержать агрессивных примесей и токопроводящей пыли, в концентрациях, снижающих технические параметры двигателей. Исполнение по степени защиты IP20.

15.3. Вентильные двигатели серии ЗДВУ

Дисковые вентильные электродвигатели серии ЗДВУ предназначены для приводов устройств, нуждающихся в двигателях, ограниченных по длине, к которым, в частности, относятся: приводы промышленных роботов и станков с ЧПУ, конвейерные линии, передвижные транспортные средства, полиграфическое оборудование, швейные машины, центрифуги, смесители, насосы, рефрижераторы, медицинские аппараты, кузнечно-прессовое оборудование. Электродвигатели обеспечивают прецизионное позиционирование и высокие динамические свойства.

Работа двигателей осуществляется в составе комплектного электропривода на базе транзисторного преобразователя, питаемого от трехфазной сети напряжением 380 В, частотой 50 Гц. Серия ЗДВУ имеет диапазон вращающих моментов от 2,3 до 47 Н·м и максимальных рабочих частот вращения от 2000 до 4000 об/мин. В нее входят 10 типоразмеров, охватывающих 4 размера крепежного фланца от 215 до 350 мм (табл. 15.9).

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии ЗДВУ:

ЗДВУ XXX X X XXXX УХЛ4:
1 2 3 4 5 6

1 — номер разработки 3 (дисковое исполнение с магнитами типа Nd-Fe-B); Д — двигатель; В — вентильный; У — управляемый;

2 — размер фланца (диаметр окружности расположения центров крепежных отверстий, мм);

3 — условное обозначение длины (А, S, M, L);

4 — наличие тормоза (Е — с тормозом; пробел — без тормоза);

5 — максимальная рабочая скорость, об/мин;

6 — вид климатического исполнения и категория размещения (УХЛ4).

Условия эксплуатации: высота над уровнем моря не более 1000 м; температура окружающего воздуха от +5 до +40 °С; относительная влажность до 80 % при 30 °С; окружающая среда не взрывоопасная, не содержащая токопроводящей пыли и паров веществ, вредно влияющих на изоляцию.

Исполнение по степени защиты IP54; способ охлаждения IC0040; исполнение по способу монтажа IM3081; изоляция класса нагревостойкости F.

Двигатели данной серии реверсивные. Электромеханическая часть двигателя представляет собой статор, в пазах сердечника которого уложена трехфазная обмотка. Ротор имеет вид немагнитного каркаса, в котором размещены 8 секторных постоянных магнитов. Рабочий конец вала цилиндрический. Конструкция двигателя допускает пристройку со стороны заднего подшипникового щита магнитоэлектрического безлюфтового тормоза, датчика положения ротора и датчика пути. Двигатель имеет датчики теплового контроля в виде позисторов, которые входят в состав системы теплового контроля.

Концы обмоток и цепи терморезисторов выведены на единый штепсельный разъем, расположенный на кор-

Таблица 15.9. Технические данные вентильных двигателей серии ЗДВУ

Типоразмер	$M_{\text{дл}}^{\text{мах}}$ длительный, Н·м	$n^{\text{мах}}$, об/мин	$M_{\text{за}}^{\text{мах}}$ за 1 с, Н·м	$I_{\text{ном}}$, А	Постоянные времени			Момент инерции ротора, кг·см ²	Максимальная механическая мощность, Вт	Масса, кг
					механическая, мс	электрическая, мс	тепловая, мин			
ЗДВУ 215А	2,3	3000 4000	9,2	2,6 3,4	2,3	1,0	26	2,8	580 480	4,0
ЗДВУ 215S	3,5	3000 4000	17	4,0 5,2	1,7	1,8	30	4,0	880 730	5,0
ЗДВУ 215М	4,7	3000 4000	18,8	5,4 7,4	2,1	2,6	32	5,8	1180 990	5,8
ЗДВУ 215L	7,0	3000 4000	28	7,9 11	1,7	3,4	35	7,6	1760 1470	7,4
ЗДВУ 265М	10	2000 3000	40	7,5 11	1,0	3,0	37	12	1680 1570	8,2
ЗДВУ 265L	13	2000 3000	52	9,4 14	0,9	3,9	40	15	2180 2040	10
ЗПВУ 300М	17	2000 3000	68	12 19	1,0	3,4	42	22	2850 2670	13
ЗДВУ 300L	23	2000 3000	92	17 26	1,0	4,6	45	33	3850 3615	16
ЗДВУ 350М	35	2000 3000	140	25 39	0,7	6,5	50	58	5870 5500	24
ЗДВУ 350L	47	2000 3000	188	34 51	0,8	6,7	52	65	7870 7390	30

Примечания: 1. Напряжение питания в цепи постоянного тока 300 В.

2. Значения параметров приведены для прямоугольной системы коммутации токов в фазах двигателей.

3. Масса двигателей приведена без пристроенных устройств.

4. Максимальное ускорение указано для переходных режимов.

пуске двигателя. Исполнение двигателя по способу монтажа IM3081 — фланцевое крепление (без лап) со стороны выступающего конца вала, любое пространственное положение, один выступающий конец вала.

Основной режим работы двигателей продолжительный S1. Допускается эксплуатация двигателей в кратков-

ременном S2 и повторно-кратковременном S3 режимах, включая режимы перемежающимися с частыми реверсами, пусками и электрическим торможением S4—S8 (см. 2.7). В этих случаях необходимо, чтобы средняя мощность потерь не превышала значений, соответствующих продолжительному режиму работы S1.

ГЛАВА 16

УПРАВЛЕНИЕ ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

16.1. Типовые схемы автоматического управления двигателями постоянного тока

16.1.1. Схема неререверсивного управления пуском в функции времени и динамическим торможением двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Рассматриваемая схема представляет собой разомкнутую систему автоматического управления, выполненную на релейно-контакторных элементах (приложение 1).

Подобные схемы, обладающие надежностью, простотой и невысокой стоимостью составляющих ее элементов, являются наиболее распространенными. Надежность схем зависит от качества изготовления релейно-контакторных устройств и правильного их выбора.

Все операции, связанные с включением и отключением различных элементов в рассматриваемых схемах, выполняются автоматически, т. е. без участия человека. Лишь только команды «Пуск» и «Стоп» выполняет оператор. Поэтому эти схемы более правильно следовало бы считать *полуавтоматическими*. Однако любая из них, будучи включенной в систему автоматического управления (САУ), становится *автоматической*, так как все команды по управлению, включая «Пуск» и «Стоп», выполняются в такой системе автоматически в соответствии с

управляющими электрическими сигналами.

Схема неререверсивного управления пуском двигателя постоянного тока параллельного возбуждения в функции времени с динамическим торможением при отключении представлена на рис. 16.1. Схема состоит из двух электрически не соединенных частей: силовой и управляющей. Раздельное электропитание этих частей схемы позволяет в управляющей части применять низкое напряжение (24—48 В), что повышает безопасность обслуживания схемы (наладка, регулировка). Если же силовая часть схемы рассчитана на напряжение более 220 В, то

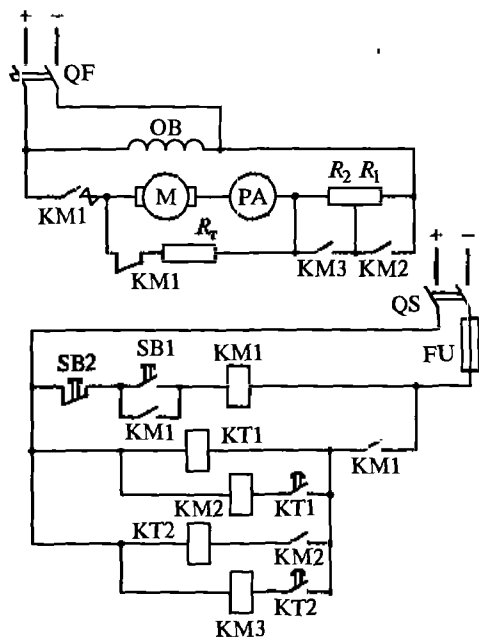


Рис. 16.1. Схема неререверсивного управления пуском в функции времени и динамическим торможением двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

раздельное питание управляющей части схемы обязательно.

Силовая часть схемы включает: двигатель (цепь якоря и цепь возбуждения), пусковой резистор с двумя элементами (R_1 и R_2), резистор динамического торможения R_t и контакты реле и контакторов, осуществляющие подключение всей силовой части схемы к питающей сети и включение ее элементов.

Управляющая часть схемы состоит из контактов, кнопок управления, катушек реле и контакторов, осуществляющих управление двигателем М при его пуске и торможении по определенной программе.

Пуск двигателя М в функции времени осуществляется с помощью реле времени КТ1 и КТ2. При кратковременном нажатии кнопки SB1 «Пуск» замыкается цепь питания обмотки контактора КМ1, при срабатывании которого замыкаются контакты КМ1, шунтирующие кнопку SB1, размыкаются контакты КМ1 в цепи резистора R_t , замыкаются контакты, включающие реле КТ1, и замыкаются силовые контакты КМ1, подключающие двигатель М к сети постоянного тока. При этом начинается пуск двигателя при включенных в цепь обмотки якоря элементов пускового резистора $R_1 + R_2$ (первая ступень пуска).

Реле времени КТ1 с выдержкой времени замедления при срабатывании своими контактами замыкает цепь катушки контактора КМ2, при срабатывании которого контакты КМ2 шунтируют элемент пускового резистора R_1 . В итоге разгон двигателя продолжается, но теперь на второй ступени пуска с сопротивлением добавочного резистора в цепи якоря R_2 . Одновременно замыкаются контакты КМ2, подключающие катушку реле времени

КТ2, которое срабатывает и с заданной выдержкой времени своими контактами подключает катушку контактора КМ3.

Контактор КМ3 срабатывает и своими контактами шунтирует элемент пускового резистора R_2 и цепь якоря двигателя оказывается включенной на полное напряжение сети постоянного тока. На этом процесс пуска заканчивается и двигатель М переходит в рабочий режим.

Таким образом, продолжительность пуска на первой ступени определяется временем замедления при срабатывании реле времени КТ1, а продолжительность пуска на второй ступени — временем замедления при срабатывании реле времени КТ2.

Для отключения двигателя необходимо кратковременно нажать кнопку SB2 «Стоп». При этом разомкнется цепь питания обмотки контактора КМ1, который своими контактами отключит якорь двигателя и цепи всех катушек реле и контакторов от сети. Следовательно, разомкнутся контакты КМ2 и КМ3, шунтирующие элементы пускового резистора, и двигатель будет подготовлен к следующему включению. Одновременно замкнутся контакты КМ1 в цепи резистора R_t и двигатель перейдет в режим динамического торможения, при котором кинетическая энергия вращающихся по инерции масс электропривода будет преобразовываться в теплоту и выделяться в резисторе R_t и обмотках в цепи якоря двигателя.

Количество ступеней пуска двигателя может быть увеличено путем добавления необходимого числа элементов сопротивления в пусковой резистор R_t с соответствующим увеличением количества реле времени КТ и контакторов КМ.

16.1.2. Схема управления пуском двигателя постоянного тока в функции времени, реверсом и торможением противовключением в функции ЭДС

Контакты двух линейных контакторов KM1 и KM2 образуют мост, в диагональ которого включен двигатель М (рис. 16.2). Направление тока в обмотке якоря этого двигателя, а следовательно, и направление вращения якоря зависят от того, какие из линейных контактов замкнуты. Так, при срабатывании контактора KM1 ток в якоре направлен от точки А к точке В, а при срабатывании контактора KM2 — от точки В к точке А.

Рассматриваемая схема управления содержит следующие коммутирующие устройства: автоматический выключатель QF, кнопки управления SB1 (сдвоенная), SB2 (сдвоенная) и SB3, контакторы KM1, KM2, KM3 и KM4, реле времени KT с замедлением при отпуске, реле напряжения KV1 и KV2. В цепь якоря двигателя последовательно включены два резистора: пусковой $r_{доб1}$ и противовключения $r_{доб2}$.

При включении автомата QF все элементы схемы оказываются под напряжением. При нажатии кнопки SB1 включается контактор KM1 и своими силовыми контактами включает в сеть двигатель М, одновременно блокировочные контакты KM1 шунтируют кнопку SB1 и включают катушку реле напряжения KV1. Начинается пуск двигателя М, при этом начальный пусковой ток двигателя I_{a1} ограничен резисторами $r_{доб1} + r_{доб2}$.

Этот пусковой ток создаст на резисторе $r_{доб2}$ падение напряжения $U_{доб2} = I_{a1} r_{доб2}$, что приведет к срабатыванию реле времени KT, и его контакты разомкнут цепь катушки контак-

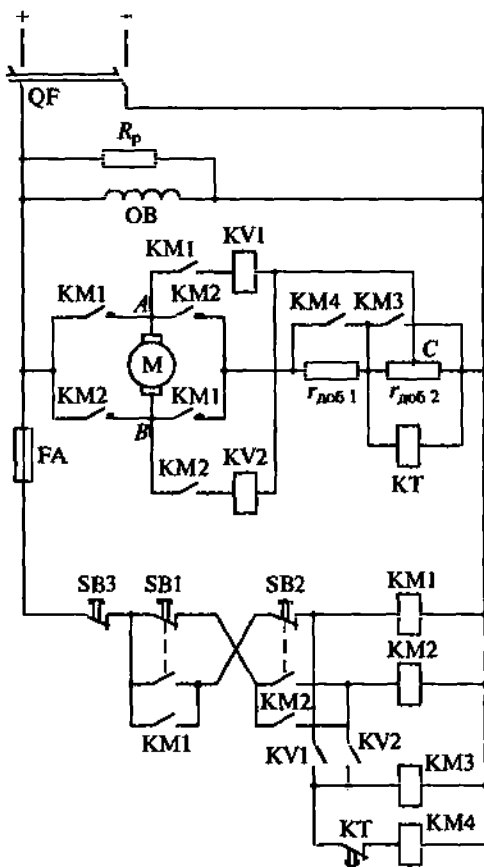


Рис. 16.2. Схема управления пуском двигателя постоянного тока в функции времени, реверсом и торможением противовключением в функции ЭДС

тора KM4. Реле напряжения KV1, включенное контактами KM1, работает и подключит цепи катушек контакторов KM3 и KM4 (цепь KM4 останется разомкнутой контактами реле времени KT). Контактор KM3 работает и своими контактами шунтирует резистор $r_{доб2}$, при этом двигатель перейдет на вторую ступень пуска, а реле времени KT отпустит и своими контактами с выдержкой времени при отпуске замкнет цепь контактора KM4, который работает и

своими контактами шунтируют резистор $r_{\text{доб1}}$. В итоге двигатель окажется под полным напряжением сети, т.е. режим пуска двигателя сменится работой в режиме естественной механической характеристики.

Для реверсирования двигателя необходимо нажать двоянную кнопку SB2. При этом отключатся контакторы KM1, KM3 и KM4 и включится контактор KM2. В результате произойдет переключение цепи якоря двигателя на другое направление тока (от точки В к точке А). При этом электромагнитный момент двигателя изменит направление и станет тормозящим по отношению к якорю, продолжающему вращение по инерции в прежнем направлении. Ток якоря будет ограничен сопротивлением резисторов $r_{\text{доб1}} + r_{\text{доб2}}$. За счет падения напряжения на резисторе $r_{\text{доб2}}$ сработает реле времени КТ и своими контактами разомкнет цепь катушки контактора KM4. Блокировочные контакты KM2 шунтируют кнопку SB2 и подключат катушку реле напряжения KV2. Однако в условиях противовключения двигателя, когда якорь за счет накопленной кинетической энергии продолжает вращаться в прежнем направлении, а ток в обмотке якоря изменил свое направление, ЭДС якоря E_a направлена *согласно* с напряжением сети. Поэтому реле напряжения KV2 в начальный момент противовключения не срабатывает.

Объясняется это следующим. При работе двигателя в основном (двигательном) режиме ЭДС якоря (противо-ЭДС) направлена *встречно* напряжению, приложенному к якорю и соединенными с ним последовательно резисторами $r_{\text{доб1}}$ и $r_{\text{доб2}}$. Поэтому напряжение между точками А и С, на которое включена катушка реле KV1, равно:

$$U_{AC} = E_a + I_a(r_{\text{доб1}} + 0,5r_{\text{доб2}}).$$

Этого напряжения достаточно для срабатывания реле KV1. Однако после реверсирования двигателя направление тока в обмотке якоря изменилось, а направление вращения якоря в первый момент осталось прежним. В этих условиях направление ЭДС якоря E_a стало *согласным* с напряжением сети. При этом выражение напряжения между точками А и С принимает вид:

$$U_{AC} = -E_a + I_a(r_{\text{доб1}} + 0,5r_{\text{доб2}}).$$

В начальный момент реверса оба слагаемых правой части этого выражения приблизительно равны, поэтому напряжение на катушке реле KV2 $U_{AC} \approx 0$. В последующие моменты времени частота вращения якоря под влиянием его тормозящего момента ЭДС якоря будет уменьшаться, а напряжение U_{AC} будет увеличиваться. При частоте вращения якоря $n \approx (0,1 - 0,2)n_n$ напряжение U_{AC} достигнет значения, достаточного для срабатывания реле KV2. Выбором точки С на резисторе $r_{\text{доб2}}$ можно корректировать величину напряжения U_{AC} .

При срабатывании реле напряжения KV2 включается контактор KM3, который своими контактами шунтирует резистор $r_{\text{доб2}}$. К этому времени процесс торможения заканчивается ($n \approx 0$) и происходит реверсирование двигателя. В этих условиях в двигателе начинается процесс пуска с ограничением пускового тока резистором $r_{\text{доб1}}$. При этом реле времени КТ отключается и его контакты с выдержкой времени на отпускание замыкают цепь катушки контактора KM4. При срабатывании KM4 шунтируется резистор $r_{\text{доб1}}$ и двигатель переходит в рабочий режим, т.е. в режим работы на естественной механической характеристике. Если же требуется работа двигателя в режиме искусственной механической характеристики, то последовательно в цепь якоря необходимо включить еще один резистор. Сопротивление этого резис-

тора $R_{\text{доб}}$ (на рис. 16.2 не показан) следует рассчитать по формуле (13.11) в соответствии с требуемой частотой вращения при заданной нагрузке двигателя.

При необходимости остановки двигателя после его торможения следует в момент изменения направления вращения якоря нажать кнопку SB3, при этом разомкнутся цепи всех контакторов и двигатель будет отключен от сети, а все реле и контакторы цепи управления окажутся в состоянии, необходимом для следующего включения двигателя.

Разрядный резистор R_p образует с обмоткой возбуждения ОВ замкнутый контур. Поэтому при отключении двигателя автоматом QF ЭДС самоиндукции, наведенная в этой обмотке возбуждения ОВ, создаст ток в этом контуре, а электромагнитная энергия, запасенная в обмотке возбуждения, будет преобразована в тепловую энергию, не создав в этой обмотке опасных перенапряжений.

16.2. Электронные устройства для управления двигателями постоянного тока

Для управления двигателем постоянного тока применяют управляемый тиристорный преобразователь переменного тока в постоянный. На рис. 16.3 показана схема тиристорного преобразователя (ТП) для питания регулируемым напряжением якорных цепей двигателей постоянного тока. Схема выпрямления — трехфазная мостовая с шестью тиристорами, управляемыми блоком системы импульсно-фазового управления СИФУ в соответствии с поступающим на его вход управляющим сигналом U_y . Обмотка

возбуждения ОВ двигателя М подключена к другому источнику постоянного тока с фиксированным напряжением (на схеме не показан). Для ослабления пульсаций тока в цепь якоря включен сглаживающий фильтр L .

Тиристорный преобразователь обеспечивает регулирование подключенного к нему двигателя постоянного тока за счет изменения напряжения, подводимого к цепи якоря. Это напряжение на выходе ТП зависит от угла управления тиристором α и определяется выражением:

$$U_a = U_{a0} \cos \alpha.$$

Здесь U_{a0} — среднее значение напряжения на выходе ТП при $\alpha = 0$,

$$U_{a0} = K_{cx} U_{2\phi},$$

где $U_{2\phi}$ — действующее фазное значение напряжения на выходе вторичной обмотки трансформатора; K_{cx} — коэффициент, зависящий от схемы выпрямления, примененной в ТП.

Для представленной на рис. 16.3 трехфазной двухполупериодной схе-

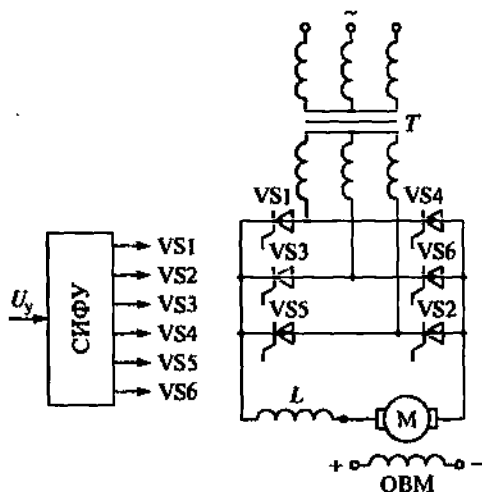


Рис. 16.3. Тиристорный неререверсивный преобразователь переменного тока в постоянный

мы выпрямления среднее значение напряжения на выходе ТП при $\alpha = 0$ равно:

$$U_{cp0} = 2,34 U_{2\phi}.$$

С увеличением угла регулирования α напряжение U_a снижается и при $\alpha = 90^\circ$ оно равно нулю.

Тиристорный преобразователь, выполненный по схеме рис. 16.3, обладает односторонней проводимостью, поэтому постоянный ток в обмотке якоря двигателя не может изменить своего направления и управление двигателем получается нереверсивным.

Для того чтобы управление было реверсивным, необходим реверсивный преобразователь. Однако следует иметь в виду, что реверсирование двигателя возможно и при нереверсивном ТП. Для этого достаточно при необходимости реверса изменить полярность на клеммах обмотки возбуждения ОВМ двигателя.

Для придания тиристорному преобразователю *реверсивных* свойств его можно сделать из двух нереверсивных тиристорных управляемых выпрямителей.

На рис. 16.4 представлена схема реверсивного ТП с нулевым выводом. В системе с реверсивным ТП возможны реверсирование двигателя без изменения направления тока в цепи возбуждения, а также режим рекуперативного торможения.

Из системы автоматического регулирования на вход управляющего блока СИФУ поступает сигнал управления U_y , в соответствии с которым на управляющие электроды тириستоров VS1 — VS6 поступают импульсы на их открывание с требуемым фазовым сдвигом. Тиристоры образуют два комплекта по три тиристора. Каждый ком-

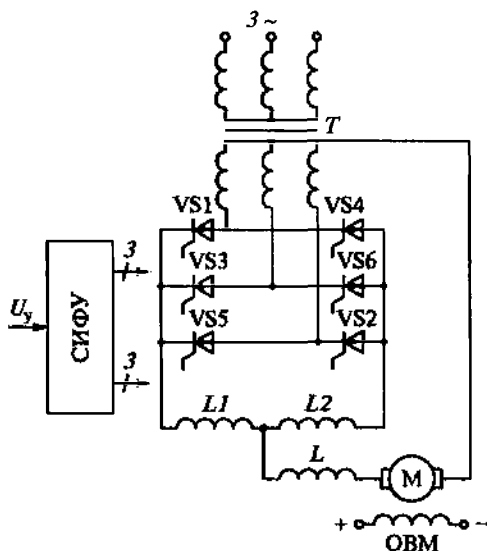


Рис. 16.4. Реверсивный тиристорный преобразователь переменного тока в постоянный

плект обеспечивает получение выпрямленного напряжения в цепи якоря двигателя определенной полярности. При необходимости реверсирования двигателя полярность напряжения на выходе ТП меняется. Дроссели $L1$ и $L2$ предназначены для ограничения уравнивающих токов между комплектами тириستоров, а дроссель L служит для ослабления пульсаций выпрямленного тока в цепи якоря двигателя.

К *достоинствам* системы управления двигателем постоянного тока посредством тиристорного преобразователя ТП следует отнести: широкий диапазон регулирования частоты вращения двигателя; линейность и жесткость механических характеристик; высокий КПД, компактность установки и высокую надежность, простоту обслуживания.

Недостатками системы являются: пульсации напряжения и тока якоря (особенно при однофазном питании),

Таблица 16.1. Тиристорные преобразователи для электроприводов постоянного тока

Тип	Назначение	Напряжение питания, В	Номинальный выпрямленный ток, А	Номинальное выпрямленное напряжение, В
АТ АТР	Питание якорных цепей двигателей постоянного тока (Р — реверсивный)	220; 380; 6000; 10 000	100—1600	230—460
АТО АТОР	Питание якорных цепей двигателей постоянного тока в схемах автоматического электропривода	220; 380	6,3—50	115; 230; 460
КТЭ	Комплектные электроприводы для механизмов металлургии	380; 6000; 10 000	100—1600	230; 460
ЭТРП	Электроприводы металлорежущих станков	380	10—200	220; 440

неблагоприятно влияющие на работу щеточного контакта двигателя. По своему быстродействию тиристорные преобразователи намного превышают электромашинные преобразователи. Так, если электромагнитная постоянная времени электромашинных преобразователей составляет от десятых долей секунды до нескольких секунд, то в ТП она не превышает нескольких сотых долей секунды.

В настоящее время управление двигателями постоянного тока посредством тиристорных преобразователей составляет основу регулируемого электропривода постоянного тока, широ-

кого диапазона мощностей: от привода металлорежущих станков и подъемных устройств до привода крупных прокатных станов.

В табл. 16.1 приведены основные технические данные некоторых типов тиристорных преобразователей для электроприводов постоянного тока.

Необходимо иметь в виду, что тиристорный преобразователь обеспечивает возможность «мягкого» пуска двигателя постоянного тока. С этой целью при пуске двигателя напряжение, подводимое к цепи якоря, постепенно повышают начиная с любого минимального значения.

РАЗДЕЛ V

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПРИБОРНЫХ УСТРОЙСТВ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

ГЛАВА 17

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

17.1. Назначение исполнительных двигателей и предъявляемые к ним требования

Электродвигатели, применяемые в приборных устройствах и автоматике, разделяют на силовые и исполнительные. *Силовые* двигатели используют в электроприводе различных механизмов приборных устройств. Они отличаются от обычных приводных двигателей разного принципа действия лишь мощностью и габаритами. Мощность этих двигателей обычно составляет от единиц до нескольких сотен ватт.

Требования к силовым двигателям приборных устройств в принципе не отличаются от требований к двигателям общего назначения малой мощности. Основными из этих требований являются высокие энергетические показатели, минимальные габариты, высокая надежность, минимальная стоимость, удобство и безопасность обслуживания, соответствие климатическим условиям и т. п.

Исполнительные двигатели работают в особых условиях и к ним кроме перечисленных требований, относящихся к силовым двигателям, предъяв-

ляются специфические требования, зависящие от их назначения. Исполнительные двигатели предназначены для преобразования управляющего электрического сигнала в механическое вращение вала с требуемой угловой скоростью и вращающим моментом. Такие двигатели работают в условиях частых пусков и остановов, так как сигнал управления систематически меняется в соответствии с программой автоматического регулирования. Исполнительные двигатели иногда называют *управляемыми*.

В приборных устройствах и системах автоматики применяют исполнительные двигатели трех видов — постоянного тока, асинхронные и шаговые. По характеру работы исполнительные двигатели делят на двигатели непрерывного и дискретного (прерывистого) действия.

В исполнительных двигателях *непрерывного действия* вращение вала происходит в течение всего времени действия управляющего сигнала, при этом частота вращения вала зависит от параметров этого сигнала (амплитуды, фазы). К исполнительным двигателям непрерывного действия относят двигатели постоянного тока и асинхронные.

В исполнительных двигателях *дискретного действия* угловое перемещение вала происходит скачками, т.е. при поступлении управляющего сигнала на обмотку двигателя вал поворачивается на определенный угол независимо от продолжительности действия этого сигнала. К исполнительным двигателям дискретного действия относят шаговые двигатели.

Специфические требования к исполнительным двигателям:

- отсутствие самохода (при прекращении управляющего сигнала ротор двигателя должен остановиться);

- минимальная криволинейность механических характеристик, что обеспечивает устойчивую работу двигателя в широком диапазоне частот вращения;

- надежность и экономичность способов управления;

- быстроедействие (малоинерционность), т.е. минимальное время разгона ротора до установившейся частоты вращения;

- минимальное напряжение трогания — минимальное значение управляющего сигнала, вызывающее вращение ротора двигателя.

При решении вопроса о целесообразности применения двигателя в качестве исполнительного исходят из того, в какой мере он удовлетворяет перечисленным требованиям. Специфика требований, предъявляемых к исполнительным двигателям, привела к необходимости создания специальных конструкций этих двигателей.

17.2. Исполнительные двигатели постоянного тока

В качестве исполнительных двигателей постоянного тока применяют двигатели с независимым электромаг-

нитным возбуждением или с возбуждением постоянными магнитами. Наличие щеточно-коллекторного узла ограничивает применение исполнительных двигателей постоянного тока, например, делает невозможным их использование во взрыво- и пожароопасных средах. Однако исполнительные двигатели постоянного тока имеют ряд *достоинств*: их механические и регулировочные характеристики практически прямолинейны, способы управления просты, габаритные размеры и масса меньше, чем у асинхронных исполнительных двигателей.

В исполнительных двигателях постоянного тока с электромагнитным возбуждением возможно применение как якорного, так и полюсного способов управления. В двигателях с возбуждением постоянными магнитами возможно только якорное управление.

При **якорном управлении** исполнительного двигателя с электромагнитным возбуждением (рис. 17.1, а) обмотка полюсов является обмоткой возбуждения ОВ, а обмотка якоря — обмоткой управления ОУ. Во время работы исполнительного двигателя к обмотке возбуждения подводится неизменное напряжение $U_{\text{в}}$, а на обмотку управления подается управляющий сигнал (напряжение управления) $U_{\text{у}}$ от блока управления БУ, являющегося элементом автоматической системы. Напряжение $U_{\text{у}}$ подается в моменты времени, когда требуется включение исполнительного двигателя. В двигателях с возбуждением постоянными магнитами обмотка возбуждения отсутствует и к двигателю подводят лишь управляющий сигнал (рис. 17.1, б).

При якорном управлении механические характеристики $\omega = f(M)$ прямолинейны и параллельны друг другу (рис. 17.2, а), а это значит, что жест-

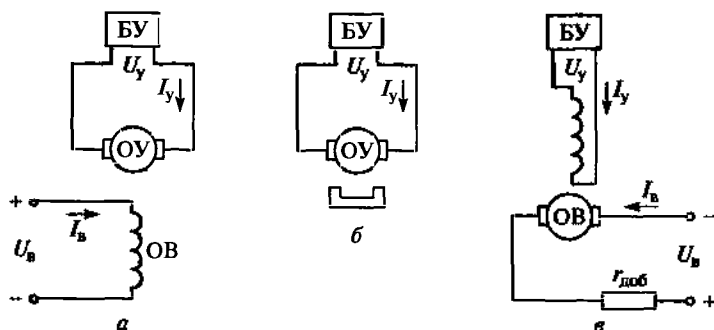


Рис. 17.1. Принципиальные схемы исполнительных двигателей постоянного тока при якорном (а, б) и полюсном (в) способах управления

кость характеристик при разных значениях напряжения управления остается одинаковой; максимальный вращающий момент соответствует пуску двигателя, что удовлетворяет предъявляемым к исполнительным двигателям требованиям.

При **полюсном управлении** обмотка якоря является обмоткой возбуждения ОВ, а обмотка полюсов — обмоткой управления ОУ (рис. 17.1, в). Для ограничения тока возбуждения I_B в неподвижном якоре, когда противо-ЭДС $E_a = 0$ и в обмотке якоря проходит ток короткого замыкания при мощности двигателя более 10 Вт, в цепь якоря обычно последовательно включают резистор сопротивлением $r_{доб}$. Механические характеристики в этом случае хотя и прямолинейны, но не парал-

лельны друг другу: с увеличением напряжения управления жесткость характеристик уменьшается (рис. 17.2, б). Существенный *недостаток* полюсного управления — возможность самохода. Причиной этому является магнитный поток остаточного магнетизма, под действием которого при снятии сигнала управления с обмотки возбуждения на якорь двигателя продолжает действовать вращающий момент. Для устранения этого самохода при полюсном управлении необходимо на валу исполнительного двигателя создать постоянно действующую механическую нагрузку, удерживающую якорь двигателя в неподвижном состоянии при снятии напряжения управления с обмотки возбуждения.

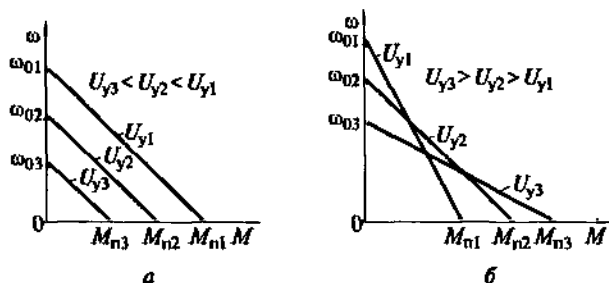


Рис. 17.2. Механические характеристики исполнительного двигателя постоянного тока при якорном (а) и полюсном (б) способах управления

Достоинством полюсного управления является небольшая мощность, обычно не превышающая 10—30 % от потребляемой двигателем мощности. Это позволяет применять в цепи управления исполнительных двигателей с полюсным управлением усилители мощности с небольшим коэффициентом усиления.

17.3. Конструкция исполнительных двигателей постоянного тока

В приборных устройствах и автоматических системах получили применение исполнительные двигатели постоянного тока следующих разновидностей: с обычным (зубцовым) якорем, с полым немагнитным якорем, с дисковым якорем и с гладким (беспазовым) якорем.

Двигатели с обычным (зубцовым) якорем. Обмотка такого двигателя расположена в пазах стального шихтован-

ного сердечника якоря. Данные двигатели в принципе мало отличаются от двигателей постоянного тока традиционной конструкции. Разница состоит лишь в том, что в исполнительном двигателе, который большую часть времени работает в переходном режиме, станину так же, как и якорь, делают шихтованной, что позволяет уменьшить магнитные потери и снизить температуру перегрева двигателя.

На рис. 17.3 показано устройство исполнительного двигателя постоянного тока с электромагнитным возбуждением и обычным (зубцовым) якорем. Двигатели такой конструкции применяют лишь в случаях, когда к исполнительному двигателю не предъявляют повышенных требований по быстродействию.

Двигатели с полым немагнитным якорем. Якорь двигателя выполнен в виде полого стакана из эпоксидной смолы, в стенках которого расположена обмотка якоря. Для получения такой конструкции обмотку якоря ук-

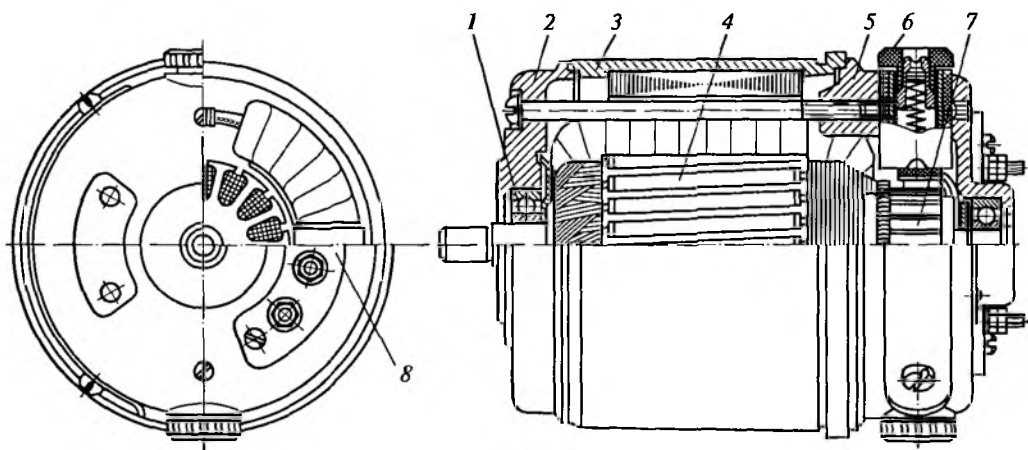


Рис. 17.3. Устройство исполнительного двигателя постоянного тока с электромагнитным возбуждением и обычным (зубцовым) якорем:

1 — подшипник; 2, 5 — подшипниковые щиты; 3 — статор; 4 — якорь; 6 — щеткодержатель; 7 — коллектор; 8 — клеммная колодка

ладывают на цилиндрический каркас, соединяют с коллектором на пластмассе и заливают эпоксидной смолой. В итоге получается механически прочная конструкция в виде полого стакана, дно которого вместе с коллектором закреплено на валу двигателя (рис. 17.4, *а*). Индуктивность обмотки такого якоря намного снижена, так как обмотка не расположена в пазах стального сердечника. Это существенно улучшает коммутацию и в 2—3 раза увеличивает срок службы щеточно-коллекторного узла, упрощает уход за двигателем и повышает стабильность его характеристик. Но основное преимущество двигателя с полым немагнитным ротором, по сравнению с двигателем традиционной конструкции, состоит в том, что вращающаяся часть двигателя не имеет стального сердечника. Это снижает момент инерции ротора и повышает быстродействие исполнительного двигателя. Электро-механическая постоянная времени двигателей с полым немагнитным якорем не превышает 20 мс.

На рис. 17.4, *б* показано устройство исполнительного двигателя с полым якорем серии ДПР. Постоянный магнит цилиндрической формы, распо-

ложенный внутри полого якоря, обеспечивает возбуждение двигателя. Подшипниковые щиты выполнены из алюминиевого сплава и армированы стальными втулками для размещения шарикоподшипников.

Двигатели с дисковым якорем. Дисковый якорь — это пластмассовый диск, на плоскости которого печатным способом нанесена обмотка якоря (рис. 17.5, *а*). Такая конструкция якоря обусловила видоизменение и других элементов двигателя (рис. 17.5, *б*). Возбуждение двигателя осуществляется постоянными магнитами 2, расположенными на статоре 6 и обращенными своими полюсными наконечниками 4 к одной стороне дискового якоря 1. С другой стороны якоря помещено кольцо 3 из ферромагнитного материала, выполняющее функцию неподвижного сердечника якоря, т.е. это элемент магнитной системы двигателя. Возможна конструкция подобного двигателя с электромагнитным возбуждением. В этом случае каждый сердечник полюса снабжен полюсной катушкой. Обычно двигатели с дисковым якорем не имеют отдельного коллектора, а электрический контакт щеток 5 и обмотки яко-

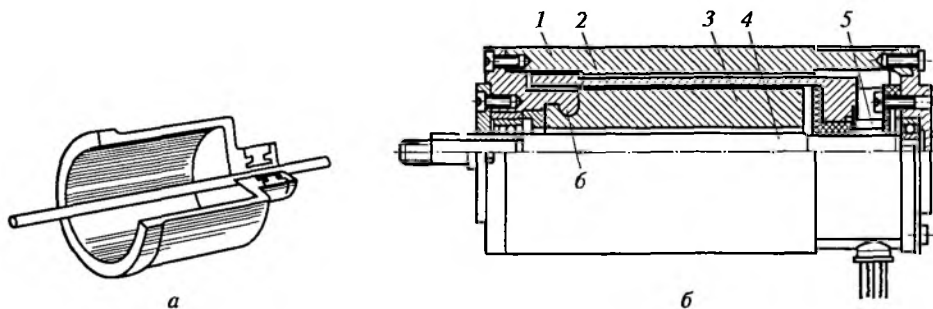


Рис. 17.4. Полый немагнитный якорь (*а*) и устройство исполнительного двигателя постоянного тока с полым немагнитным якорем (*б*):

1 — станина; 2 — полый якорь; 3 — постоянный магнит; 4 — вал; 5 — коллектор;
6 — подшипниковый щит

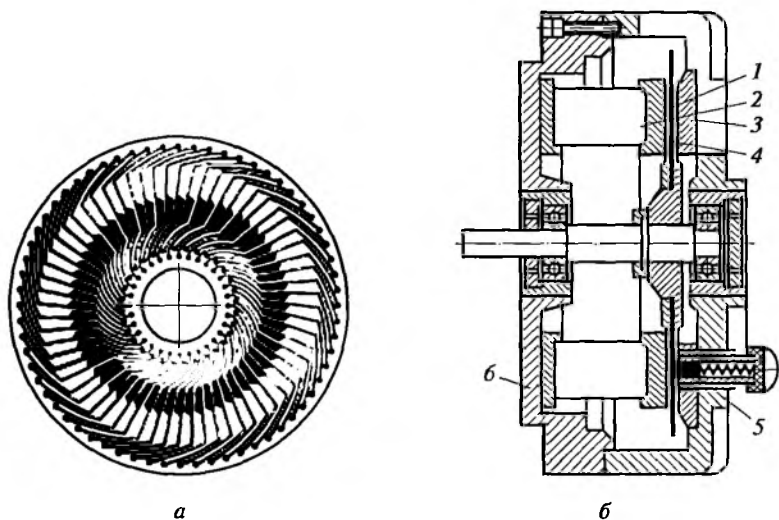


Рис. 17.5. Двигатель постоянного тока с дисковым якорем:

a — дисковый якорь; *б* — устройство (продольный разрез) двигателя; 1 — дисковый якорь; 2 — постоянные магниты; 3 — сердечник якоря (неподвижный); 4 — полюсные наконечники; 5 — щетки; 6 — статор

ря происходит непосредственно на одной из сторон печатного якоря.

Электромагнитный момент в двигателях с дисковым якорем создается так же, как и в двигателях обычной конструкции.

Обмотка якоря наносится на обе стороны пластмассового диска электрохимическим методом травления фольги. Так как секции печатной обмотки одновитковые, а количество секций ограничено площадью диска, то двигатели с дисковым якорем обычно выполняют на низкое напряжение.

Легкий якорь, не имеющий стального сердечника, обеспечивает двигателям высокое быстродействие и улучшенные условия работы щеточно-коллекторного узла.

Недостаток двигателей с дисковым якорем — ограниченный срок службы, обусловленный износом печатной обмотки якоря, имеющей скользящий контакт со щетками. В некоторых конструкциях двигателей этот недостаток

устраняют применением отдельного коллектора, но при этом усложняется устройство двигателя.

Двигатели с гладким (беспазовым) якорем. Якорь этого двигателя имеет стальной шихтованный сердечник. Но в отличие от двигателя с зубцовым якорем двигатель с беспазовым (гладким) якорем не имеет зубцов на сердечнике якоря, а двухслойная обмотка якоря располагается на гладкой поверхности сердечника (рис. 17.6). Якорь бандажируется стеклолентой и заливается в вакууме компаундом или пропитывается лаком.

Исполнительные двигатели с гладкой конструкцией якоря имеют следующие *достоинства*. Магнитная индукция в зазоре двигателя в 2—3 раза больше, чем при зубцовом якорю, в котором большое значение магнитной индукции недопустимо из-за сильного магнитного насыщения зубцового слоя якоря и резко возрастающих при этом магнитных потерь. Открытое располо-

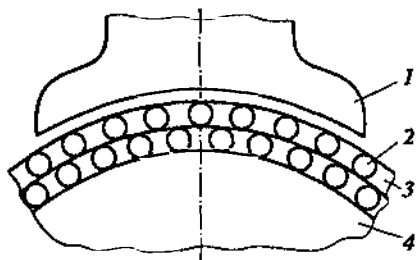


Рис. 17.6. Устройство гладкого якоря:

1 — главный полюс; 2 — обмотка якоря; 3 — скрепляющий слой компаунда; 4 — сердечник якоря

жение проводников обмотки якоря на гладком сердечнике и отсутствие магнитных потерь в зубцовом слое позволяют существенно увеличить нагрузку двигателя при заданных габаритных размерах.

Большой немагнитный промежуток между сердечником якоря и главными полюсами и открытое расположение проводников обмотки якоря способствуют безыскровой работе щеточно-коллекторного узла и ослабляют действие реакции якоря, что повышает надежность двигателей и стабилизирует их характеристики. Обычно для возбуждения исполнительных двигателей с гладким якорем применяют постоянные магниты.

Из рассмотренных малоинерционных двигателей машины с гладким якорем имеют наиболее высокое быстродействие. Это объясняется тем, что улучшенные условия коммутации позволяют применить в двигателях якорь малого диаметра и большой длины, что значительно снижает электромеханическую постоянную времени, которая, как известно, пропорциональна квадрату диаметра якоря $T \propto D^2$. Ниже приведены значения относительной электромеханической постоянной времени для двигателей с различной кон-

струкцией якоря $T_{эм}^* = T_{эм}/T_з$, где $T_з$ — электромеханическая постоянная времени двигателей с зубцовым якорем.

Конструкция якоря	Зубцовый	Полый	Дисковый	Гладкий
$T_{эм}^*$	1,0	0,4	0,6	0,07

Модификацией исполнительных двигателей постоянного тока являются **моментные (высокомоментные) двигатели**. Моментным называют вращающийся электродвигатель, предназначенный для создания необходимого вращающего момента на валу при ограниченном его перемещении, неподвижном состоянии или медленном вращении. Моментные двигатели применяют в электрических приводах механизмов подачи станков с числовым программным управлением (ЧПУ), для управления рабочими органами промышленных роботов, управления запорными устройствами трубопроводов, по которым транспортируются рабочие вещества (топливо, вода и т.п.).

Моментные двигатели постоянного тока могут быть с щеточно-коллекторным узлом или бесконтактными (вентильными), преимущества которых изложены в 13.10.2.

В заключение следует отметить, что хотя исполнительные двигатели постоянного тока обычной конструкции имеют ряд существенных недостатков (взрывоопасность, радиопомехи и т.д.), но по своим техническим показателям (прямолинейность характеристик, небольшие габариты, более высокий КПД) они превосходят двигатели переменного тока.

Ниже приводятся технические данные двигателей постоянного тока малой мощности, используемые в качестве исполнительных, моментных, а также силовых двигателей, предназна-

ченных для привода различных специальных механизмов в приборных устройствах и автоматических системах.

17.3.1. Исполнительные коллекторные двигатели постоянного тока с полым малоинерционным якорем типов ДП35, ДП40, ДП50 и ДП60

Эти двигатели (см. рис. 17.4, а) предназначены для использования в реверсивных электроприводах механизмов подачи металлорежущих станков с ЧПУ, в приводах промышленных роботов и некоторых других автоматических систем и приборных устройств, если по своим техническим и габаритным показателям эти двигатели соответствуют предъявляемым требованиям.

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии ДП:

ДП X X X X X X X X X
1 2 3 4 5 6 7 8 9

1 — ДП — двигатель коллекторный постоянного тока с возбуждением постоянными магнитами;

2 — диаметр корпуса цилиндрической формы, мм (35, 40, 50 или 60);

3 — номинальная мощность, Вт (25, 40, 60 или 90);

4 — номинальная частота вращения, тыс. об/мин (4);

5 — номинальное напряжение питания, В (24);

6 — конструкция якоря Р11 (якорь с проволоочной обмоткой, выведенной на коллектор);

7 — конструкция статора С09 (статор явнополюсный с постоянным магнитом);

8 — со встроенным (пристроенным) высокочастотным тахогенератором постоянного тока аналогичной конструкции (Д0940);

9 — климатическое исполнение и категория размещения (УХЛ4).

Пример полного обозначения типоразмера исполнительного двигателя: ДП35-25-4-24-Р11-Д0940-УХЛ4: двигатель постоянного тока с полым малоинерционным якорем, диаметр корпуса 35 мм, номинальная мощность 25 Вт, номинальная частота вращения 4000 об/мин, якорь полый с проволоочной обмоткой и коллектором, статор явнополюсный с постоянным магнитом, с пристроенным высокочастотным тахогенератором, климатическое исполнение и место размещения УХЛ4.

Условия эксплуатации: температура окружающей среды от +1 до +35 °С (предельное значение +40 °С); относительная влажность воздуха 80 % при температуре 25 °С.

Исполнительные двигатели типа ДП, указанные в табл. 17.1, представ-

Таблица 17.1. Технические данные исполнительных коллекторных двигателей постоянного тока с полым якорем

Параметр	ДП35	ДП40	ДП50	ДП60
Номинальное напряжение питания, В	24	24	24	24
Номинальная мощность, Вт	25	40	60	90
Номинальная частота вращения, об/мин	4000	4000	4000	4000
Номинальный момент нагрузки, Н·м	0,0600	0,0955	0,1430	0,2160
Начальный пусковой момент, Н·м	0,216	0,430	0,880	1,770
Номинальный потребляемый ток, А	2,0	3,0	4,3	5,5
Начальный пусковой ток, А	8,0	16,5	40,0	87,0
Масса, кг, не более	0,8	1,0	1,7	2,6

Таблица 17.2. Габаритные и установочно-присоединительные размеры исполнительных двигателей ДП35, ДП40, ДП50 и ДП60 исполнения по способу монтажа IM3681 (см. рис. 17.7)

Типоразмер	Размеры, мм								
	<i>D</i>	<i>D</i> ₁	<i>d</i>	<i>d</i> ₁	<i>l</i>	<i>l</i> ₁	<i>l</i> ₂	<i>l</i> ₃	<i>l</i> ₈
ДП35-25-4-24-Р11-Д0940	35	40	М3	25	135	69,3	15,0	13	51
ДП40-40-4-24-Р11-Д0940	40			32	145	81,5	17,0	15	
ДП50-60-4-24-Р11-Д0940	50			40	165	101,0	19,5	17	
ДП50-90-4-24-Р11-Д0940	60		М4	50	187	122,0			

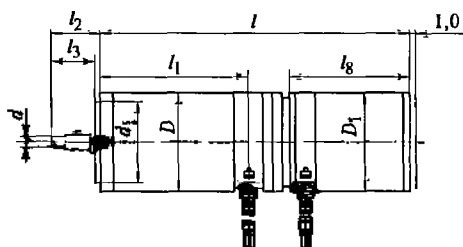


Рис. 17.7. Габаритные и установочно-присоединительные размеры исполнительных коллекторных двигателей с полым якорем ДП35, ДП40, ДП50 и ДП60 исполнения по способу монтажа IM3681 (см. табл. 17.2)

ляют собой сочетание коллекторного двигателя и жестко закрепленного на его валу тахогенератора аналогичной конструкции. Корпус двигателя, являющийся одновременно магнитопроводом, представляет собой полый цилиндр из магнитомягкой стали. Якорь двигателя полый (см. рис. 17.4, а) без сердечника. Обмотка якоря простая петлевая. Исполнение двигателя по степени защиты IP44, охлаждение естественное (IC0041). Режим работы двигателей продолжительный (S1). Двигатели работают при любом направлении вращения, допускается изменение направления вращения «на ходу», без предварительной остановки. При этом амплитуда тока реверса не должна превышать амплитуды пускового тока. Двигатели невосстанавливаемые; средний срок службы 6 лет.

Габаритные и установочно-присоединительные размеры исполнительных двигателей представлены в табл. 17.2 и на рис. 17.7.

17.3.2. Исполнительные коллекторные двигатели с гладким якорем типов ДП20, ДП25, ДП32 и ДП40

Исполнительные двигатели с гладкой конструкцией якоря (см. рис. 17.6) имеют следующие *достоинства*. Магнитная индукция в зазоре этого двигателя в 2—3 раза больше, чем при зубцовом якоре, в котором такое значение магнитной индукции недопустимо из-за сильного магнитного насыщения зубцового слоя якоря и резкого возрастания при этом магнитных потерь. Открытое расположение про-

водников обмотки якоря на гладком сердечнике и отсутствие магнитных потерь в зубцовом слое позволяют существенно увеличить нагрузку двигателя при заданных габаритных размерах.

Структура обозначения типоразмеров двигателей серии ДП:

ДП X X X X X X X X X X
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

1 — ДП — двигатель коллекторный постоянного тока с возбуждением постоянным магнитом;

2 — диаметр корпуса цилиндрической формы, мм (20, 25, 32 и 40);

3 — номинальная мощность, Вт (1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,0; 10; 16 и 25);

4 — номинальная частота вращения, тыс. об/мин (3; 4; 6);

5 — напряжение питания номинальное, В (12; 27);

6 — конструктивное исполнение по способу монтажа (ИМ3681 или ИМ3682);

7 — конструкция статора С22 (статор неявнополюсный с постоянным кольцевым магнитом);

8 — конструкция якоря Р11 (с проволочной обмоткой, выведенной на коллектор);

9 — реверсивный (Д41);

10 — климатическое исполнение и категория размещения У3.

Пример полного обозначения типоразмера исполнительного двигателя: ДП20-1-4-12-ИМ3682-С22-Р11-Д41-У3: исполнительный коллекторный двигатель с гладким якорем с возбуждением постоянным магнитом, диаметр корпуса 20 мм, номинальная мощность 1 Вт, номинальная частота вращения 4000 об/мин, исполнение по способу монтажа ИМ3682 (фланцевое крепление с двумя выступающими концами вала), статор с кольцевым постоянным магнитом, якорь гладкий с проволочной обмоткой, выведенной на коллектор, двигатель реверсивный, климатическое исполнение и место установки У3.

Таблица 17.3. Технические данные исполнительных коллекторных двигателей постоянного тока с гладким якорем

Типоразмер	Напряжение питания, В	Номинальный момент нагрузки, 10^{-4} Н·м	Потребляемый ток, А, не более	Частота вращения, об/мин	Пусковой момент, 10^{-4} Н·м	Масса, г, не более
ДП20-1-4-12	12	25	0,207	4000 ± 600	90	80
ДП20-1,6-6-12	12	25	0,305	6000 ± 900	100	80
ДП20-1,6-6-27	27	25	0,135	6000 ± 900	100	80
ДП25-2,5-4-12	12	60	0,425	4000 ± 600	260	147
ДП25-4-6-12	12	65	0,670	6000 ± 900	300	147
ДП25-2,5-4-27	27	65	0,914	4000 ± 600	240	147
ДП25-4-6-27	27	65	0,305	6000 ± 900	260	147
ДП32-6-3-12	12	195	0,960	3000 ± 450	800	306
ДП32-10-6-12	12	160	1,420	6000 ± 900	1000	306
ДП32-6-3-27	27	195	0,435	3000 ± 450	780	306
ДП32-10-6-27	27	160	0,640	6000 ± 900	1100	306
ДП40-16-3-12	12	520	2,400	3000 ± 450	1900	575
ДП40-25-6-12	12	400	3,300	6000 ± 900	2200	575
ДП40-16-3-27	27	520	1,080	3000 ± 450	1900	575
ДП40-25-6-27	27	400	1,460	6000 ± 900	2500	575

Условия эксплуатации: температура окружающей среды от -50 до $+60^{\circ}\text{C}$; относительная влажность воздуха 98 % при температуре $+25^{\circ}\text{C}$. Режим работы продолжительный S1. Электромеханическая постоянная времени $T_{\text{эм}} = 0,025$ с. Двигатели невосстанавливаемые; средний срок службы 3 года.

Технические данные двигателей приведены в табл. 17.3.

17.3.3. Вентильные двигатели серии ВК

Вентильные двигатели серии ВК (табл. 17.4) представляют собой бесконтактные двигатели постоянного тока небольшой мощности, предназначенные для привода различных механизмов аэрокосмической техники. Питание обмотки статора от сети постоянного тока напряжением 27 В осуществляется через инвертор, а возбуждение двигателей — от постоянного магнита, расположенного на роторе.

Отсутствие в двигателе щеточно-коллекторного узла избавило двигатели серии от недостатков, свойственных коллекторным двигателям, и в то

же время повысило их надежность, сделало их пожаро- и взрывобезопасными, что позволило их успешно применять для привода механизмов в наиболее ответственных отраслях техники.

17.3.4. Универсальные коллекторные исполнительные моментные двигатели серии УВ габарита 06

Универсальные коллекторные моментные двигатели последовательного возбуждения применяются в системах управления для дистанционного привода автоматических выключателей.

Структура обозначения двигателей серии УВ:

УВ X X X X X X
1 2 3 4 5 6 7

1 — УВ — универсальные встраиваемые;

2 — габарит 06;

3 — номер длины сердечника статора 1;

4 — род питающего тока: постоянный — не обозначается; переменный однофазный — 1;

5 — буква М — моментный;

Таблица 17.4. Технические данные вентильных двигателей серии ВК

Типоразмер	Мощность, Вт	Частота вращения, об/мин	Типоразмер	Мощность, Вт	Частота вращения, об/мин
ВК-1316	1,6	6000	ВК-1526	16	6000
ВК-1318	1,6	10 000	ВК-1533	16	3000
ВК-1323	1,0	3000	ВК-1534	16	4000
ВК-1324	1,6	4000	ВК-1618	40	10 000
ВК-1414	4,0	4000	ВК-1626	40	6000
ВК-1423	4,0	3000	ВК-1633	25	3000
ВК-1424	6,0	4000	ВК-1634	40	4000
ВК-1425	6,0	5000	ВК-1818	90	10 000
ВК-1518	16	10 000	ВК-1826	90	6000
ВК-1524	10	4000	ВК-1418	6,0	10 000

Таблица 17.5. Технические данные универсальных коллекторных моментных двигателей УМ-061

Типоразмер	Род тока	Частота, Гц	Напряжение, В	Типоразмер	Род тока	Частота, Гц	Напряжение, В
УВ-061-1-М-64-ТЗ	Одно-фазный	50	254	УВ-061-1-М-64-УЗ	Одно-фазный	60	230
УВ-061-1-М-64-ТЗ	То же	50	230	УВ-061-1-М-64-УЗ	То же	50	254
УВ-061-1-М-64-ТЗ	»	60	220	УВ-061-1-М-64-УЗ	»	50	240
УВ-061-1-М-64-ТЗ	»	60	230	УВ-061-1-М-64-ТЗ	»	50	240
УВ-061-1-М-64-УЗ	»	50	230	УВ-061-М-64-ТЗ	Постоянный	—	220
УВ-061-1-М-64-УЗ	»	60	220	УВ-061-М-64-УЗ	То же	—	220

6 — пусковой момент (не менее), кг·см (64 кг·см = 6,27 Н·м);

7 — климатическое исполнение и категория размещения (УЗ или ТЗ).

Условия эксплуатации: окружающая среда невзрывоопасная, не содержащая токопроводящей пыли в концентрациях, снижающих параметры двигателя в недопустимых пределах. Режим работы кратковременный S2. Рабочее положение вала произвольное. Исполнение по способу защиты — открытое, исполнение по способу монтажа — с крепительным фланцем на подшипниковом щите.

Двигатели имеют минимальные габариты благодаря использованию пакета

электротехнической стали в качестве корпуса и отсутствию вентилятора.

Двигатели изготавливают с подшипниками качения, но по желанию заказчика двигатели могут быть выполнены на подшипниках скольжения.

Серия включает 12 типоразмеров двигателей, различающихся параметрами электропитания: родом тока, частотой и напряжением (табл. 17.5).

17.3.5. Высокомomentные двигатели постоянного тока

Двигатели предназначены для использования в составе электроприводов механизмов подачи станков с ЧПУ

Таблица 17.6. Технические данные высокомоментных двигателей постоянного тока

Типоразмер	Напряжение питания, В	Номинальный момент, Н·м	Номинальная мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Диаметр/длина корпуса, мм
ДПМ-5,2	110	5,2	0,75	1500	130/374
ДПМ-2,5	110	2,5	0,35	1500	130/310
ДПМ-1,6	110	1,6	0,25	1500	110/325
ДПМ-0,8	60	0,8	0,12	1500	110/280
ДПМ-12	110	9,6	1,1	1000	180/425
2ДПМ-0,13	24	0,13	0,25	2500	110/325
2ДПМ-0,35	27	0,35	0,060	2200	110/250
2ДПМ-0,47	36	0,47	0,10	2200	110/280

и в механизмах управления рабочими органами промышленных роботов (табл. 17.6). Возбуждение двигателей от постоянных магнитов. Их выпускают со встроенным тахогенератором или без него, а также со встроенным терморезистором тепловой защиты двигателя при недопустимом перегреве. Двигатели имеют закрытое исполнение по степени защиты и способ вентиляции IC0141.

Условия эксплуатации: температура окружающей среды от +5 до +40 °С; относительная влажность окружающего воздуха 98 % при температуре 25 °С.

Особенности работы: равномерность вращения; высокая динамика переходных процессов; большое значение вращающего момента при малых частотах вращения, что допускает непосредственное соединение вала двигателя с исполнительным механизмом; надежная коммутация в условиях больших ускорений и перегрузок. Возбуж-

дение двигателей постоянными магнитами.

17.3.6. Коллекторные двигатели постоянного тока, применяемые в качестве силовых двигателей для привода различных механизмов и устройств

В табл. 17.7 приведены технические данные двигателей постоянного тока с электромагнитным возбуждением и возбуждением постоянными магнитами.

Типоразмеры ДР-1,5РА и МКМ являются редукторными двигателями и представляют собой соединение собственно двигателя с механическим редуктором. Такие двигатели позволяют получить на выходном валу значительный вращающий момент при небольшой частоте вращения.

Двигатели постоянного тока серии СЛ с электромагнитным возбуждени-

Таблица 17.7. Технические данные силовых коллекторных двигателей постоянного тока

Тип двигателя	Напряжение U_a/U_b , В	$P_{ном}$, Вт	$I_{аном}$, А	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$M_{ном}$, 10^{-2} Н·м	Диаметр/длина корпуса, мм	Способ возбуждения
Д-15	27/27	15	2,3	6000	24	—	40/88	Независимый
Д-25Г	27/27	25	2,5	6000	37	—	52/98	То же
Д-75М	60/27	75	2	7500	48	9,56	62/133	»
Д-120М	27/27	120	25	1200	—	9,56	90/195	»
СД-20	60/27	20	0,7	6000	—	3,19	52/98	»
СД-150	60/27	150	4	7500	56	19,1	78/180	»
СД-250А	60/27	250	6	6000	68	39,2	101/185	»
ДМ-1,6-8А	27/—	1,6	0,3	8000	20	0,2	26/52	Постоянными магнитами
ДМ-10-6А	27/—	10	1,5	6000	25	1,56	32/88	То же
ДП-1,6-13А	13,5/—	1,6	0,6	5200	20	0,3	24/45	»
ДР-1,5РА	27/27	1,5	1	153	9,8	980	40/100	Независимый
МКМ	6/—	0,01	0,09	10	—	100	47/40	Постоянными магнитами

Таблица 17.8. Технические данные коллекторных двигателей постоянного тока независимого возбуждения серии СЛ

Типо-размер	$P_{ном}$, Вт	$U_{ном}$, В	I_b , А	I_a , А	$M_{ном}$, 10^{-2} Н·м
СЛ-121	5,0	110	0,07	0,21	1,4
СЛ-221	13	110	0,05	0,35	3,5
СЛ-281	26	24	0,26	2,4	5,0
СЛ-321	38	110	0,11	0,7	12,5
СЛ-569	175	110	0,11	2,2	47,5

ем широко применяются в системах автоматики в качестве исполнительных и силовых двигателей. В табл. 17.8 приведены технические данные типовых размеров этих двигателей, получившие наибольшее применение. Устройство двигателя серии СЛ показано на рис. 17.3.

Коллекторные двигатели постоянного тока параллельного возбуждения серии ПЛ габарита 06 (табл. 17.9) применяют для привода различных меха-

Таблица 17.9. Технические данные коллекторных двигателей постоянного тока серии ПЛ06

Типо-размер	$P_{ном}$, Вт	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А	$\eta_{ном}$, %	$n_{ном}$, об/мин
ПЛ-061	60	110	1,10	53,0	1500
	60	220	0,55	53,8	1500
	90	110	1,56	56,0	3000
	90	220	0,76	57,8	3000
ПЛ-062	90	110	1,51	58,0	1500
	90	220	0,76	57,5	1500
	120	110	1,85	62,4	3000
	120	220	0,95	61,0	3000

низмов. Номинальный режим работы двигателей продолжительный S1. Направление вращения может быть любым, но должно оговариваться при заказе двигателей.

Условия эксплуатации: температура окружающей среды при климатическом исполнении УХЛ от +1 до +35 °С, при климатическом исполнении Т до +45 °С; относительная влажность воздуха 65 % при температуре 20 °С для климатического исполнения УХЛ и

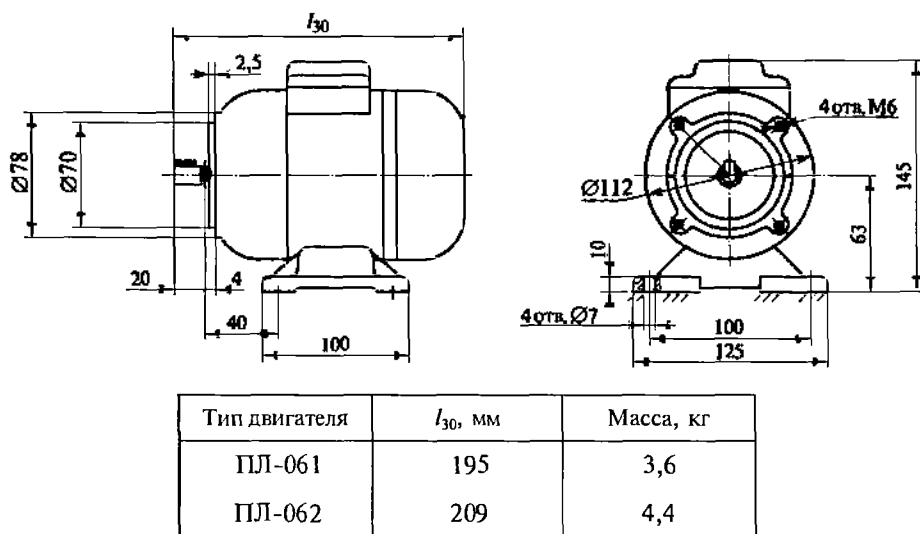


Рис. 17.8. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей серии ПЛ габарита 06 исполнения по способу монтажа IM2181

89 % при температуре 27°C для исполнения Т.

Крепление двигателей при их монтаже возможно как фланцевое, так и на лапах. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей ПЛ приведены на рис. 17.8.

В качестве силовых управляемых двигателей постоянного тока могут быть применены двигатели серий 2П и 4П с высотами оси вращения 90 и 100 мм (см. 14.1.1 и 14.2).

17.4. Исполнительные асинхронные двигатели

На статоре асинхронного исполнительного двигателя расположены две однофазные обмотки: обмотка возбуждения ОВ, постоянно включенная в сеть переменного тока на неизменное напряжение U_1 , и обмотка управления ОУ, на которую подают сигнал U_y от блока управления БУ (рис. 17.9).

Для работы исполнительного асинхронного двигателя необходимо, чтобы обмотки статора создавали вращающееся магнитное поле. Условие возникновения такого поля — наличие в двигателе пространственного и временного сдвига МДС фазных обмоток статора. Пространственный сдвиг МДС

обеспечивается конструкцией двигателя: фазные обмотки статора расположены так, что их оси сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол 90° эл. град. Временной (фазовый) сдвиг МДС создается включением фазных обмоток статора по специальным схемам, содержащим фазовращатель или фазосдвигающий конденсатор в цепи одной из обмоток.

Для управления исполнительными асинхронными двигателями применяют три способа: амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый.

При *амплитудном управлении* (рис. 17.9, а) напряжение управления U_y независимо от его значения (амплитуды) имеет фиксированный фазовый сдвиг на 90° относительно напряжения возбуждения U_1 . Управление исполнительным двигателем в этом случае выполняется изменением значения (амплитуды) напряжения управления U_y . Реверсирование двигателя достигается изменением фазы напряжения управления на 180° .

При *фазовом управлении* напряжение управления имеет постоянное значение (амплитуду), а управление двигателем выполняется изменением угла фазового сдвига ψ напряжения управления U_y относительно напряжения сети U_1 .

При *амплитудно-фазовом управлении* (рис. 17.9, б) в цепь обмотки возбуждения ОВ включают фазосдвигающий конденсатор С. При изменении значения (амплитуды) напряжения управления U_y меняются токи в обмотках управления и возбуждения, что приводит к изменению как величины напряжения на обмотке возбуждения U_b , так и фазового сдвига между напряжениями U_y и U_b .

Выбор способа управления асинхронным исполнительным двигателем определяется прежде всего требовани-

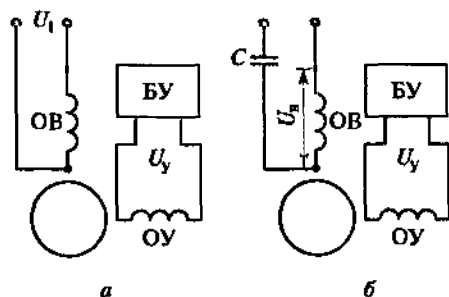


Рис. 17.9. Схемы управления исполнительными асинхронными двигателями: а — амплитудное; б — амплитудно-фазовое

ями системы управления, предъявляемыми к исполнительному двигателю. Наибольшее практическое применение получил амплитудно-фазовый способ управления с включением фазосдвигающего конденсатора в цепь обмотки возбуждения (см. рис. 17.9, б), что объясняется прежде всего простотой его реализации.

Следует иметь в виду, что КПД асинхронного исполнительного двигателя всегда ниже, чем у двигателя обычной конструкции. Объясняется это тем, что с целью устранения самохода двигателя (самопроизвольного вращения при снятии сигнала управления) обмотку ротора исполнительных двигателей выполняют с повышенным активным сопротивлением, чтобы критическое скольжение было не менее двух ($s_{кр} \geq 2$). В итоге электрические потери в роторе, величина которых пропорциональна скольжению, оказываются повышенными, что снижает КПД и полезную механическую мощность исполнительного двигателя. В связи с наличием конденсатора в цепи обмотки управления коэффициент мощности двигателя при амплитудно-фазовом управлении достигает значения 0,85—0,90.

Механические характеристики $\omega = f(M)$ исполнительного асинхронного двигателя (рис. 17.10) в отличие от аналогичных характеристик исполнительных двигателей постоянного тока (см. 3.6) криволинейны. При этом, чем меньше напряжение управления, тем ниже частота вращения холостого хода, так как с уменьшением напряжения управления усиливается эллиптичность вращающегося поля статора и увеличивается обратная составляющая этого поля, создающая на роторе тормозной момент. Значение фазосдвигающей емкости C в цепи обмот-

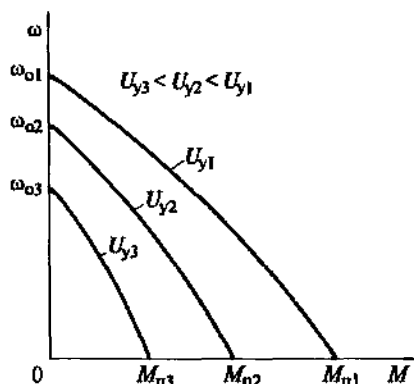


Рис. 17.10. Механические характеристики исполнительного асинхронного двигателя при амплитудно-фазовом управлении

ки возбуждения выбирается из условия получения кругового вращающегося поля при пуске двигателя, поэтому в режиме холостого хода вращающееся поле двигателя эллиптическое.

Несмотря на отмеченные недостатки в энергетических показателях и механических характеристиках, исполнительные асинхронные двигатели получили широкое применение в приборах и автоматизированном электроприводе, что объясняется прежде всего надежностью и простотой схем управления этими двигателями.

17.5. Конструкция исполнительных асинхронных двигателей

В качестве асинхронных исполнительных двигателей обычно используют асинхронные двигатели традиционной конструкции с короткозамкнутой обмоткой ротора повышенного активного сопротивления (см. 17.1), а также асинхронные двигатели с полым немагнитным ротором.

Двигатель с короткозамкнутой обмоткой ротора. Такие двигатели обыч-

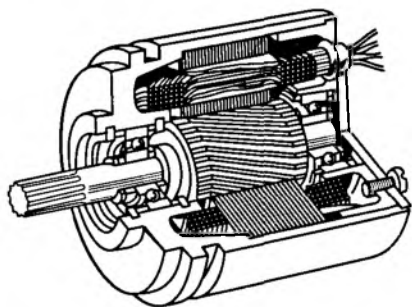
но применяют в тех случаях, если к их быстрдействию не предъявляются повышенные требования. Для устранения параметрического самохода стержни обмотки ротора выполняют из сплава с повышенным активным сопротивлением, например латуни.

Так как электромеханическая постоянная времени пропорциональна квадрату диаметра ротора ($T_{эм} \propto D_2^2$), то быстрдействие двигателя можно повысить, если уменьшить диаметр ротора, при этом увеличив его длину l_2 . Для асинхронных исполнительных двигателей обычной конструкции отношение этих размеров: $l_2/D_2 = 1,6—2,4$. Дальнейшее увеличение этого отношения затруднено, так как при слишком большой длине ротора l_2 несоосность внутренней поверхности статора и поверхности отверстий в подшипниковых щитах под посадку подшипников становится недопустимой.

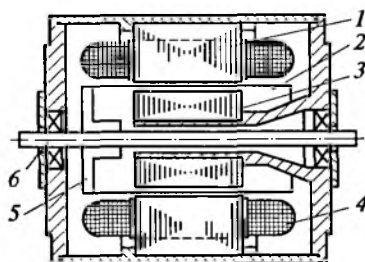
Для устранения этого недостатка применяют «сквозную» конструкцию асинхронного двигателя (рис. 17.11, а). Внутренний диаметр статора равен диаметру расточки отверстий в подшипниковых щитах, что позволяет окончательно механическую обра-

ботку указанных поверхностей вести одновременно, после установки на статор подшипниковых щитов. Такой метод изготовления сводит к минимуму возможную несоосность обрабатываемых поверхностей, обеспечивает в двигателе малый воздушный зазор ($0,03—0,05$ мм), что способствует повышению электромагнитного момента двигателя и увеличению его КПД и $\cos\phi$. Данная конструкция допускает уменьшение диаметра ротора до значений, при которых отношение длины ротора к его диаметру $l_2/D_2 = 2—3$, что значительно повышает быстрдействие двигателя.

Двигатель с полым немагнитным ротором. Для повышения быстрдействия исполнительного двигателя были созданы асинхронные исполнительные двигатели с полым немагнитным ротором. Полый немагнитный ротор представляет собой тонкостенный алюминиевый стакан 2 (рис. 17.11, б), закрепленный на валу 6 посредством втулки 5. Такой ротор имеет повышенное активное сопротивление, небольшую массу, а следовательно, малое значение электромеханической постоянной времени. Двигатель имеет два



а



б

Рис. 17.11. Исполнительные асинхронные двигатели сквозной конструкции (а) и с полым немагнитным ротором (б):

1 — статор с обмоткой; 2 — полый ротор; 3 — внутренний статор; 4 — обмотка статора; 5 — втулка ротора; 6 — вал

статора — внешний 1 с обмоткой 4 и внутренний 3 без обмотки, расположенный внутри полого ротора. Внутренний статор необходим для уменьшения магнитного сопротивления основному магнитному потоку двигателя. Возможна конструкция двигателя, когда обмотка статора расположена на внутреннем статоре.

По сравнению с исполнительными двигателями с короткозамкнутой обмоткой ротора, двигатели с полым немагнитным ротором имеют большие габаритные размеры и невысокий КПД. Это объясняется тем, что между наружным и внутренним статорами имеется значительный немагнитный промежуток, в котором замыкается основной магнитный поток двигателя.

Немагнитный промежуток складывается из толщины алюминиевого статора и двух воздушных зазоров между поверхностями ротора и статоров. Увеличение немагнитного промежутка на пути основного магнитного потока способствует росту намагничивающего тока, а следовательно, снижению коэффициента мощности двигателя и КПД. Намагничивающий ток двигателя достигает 80—90 % номинального тока в цепи статора.

Достоинства асинхронных двигателей с полым немагнитным ротором: высокое быстродействие, большой диапазон регулирования частоты вращения, стабильность характеристик, малошумность в работе.

Сравнение технических данных исполнительных асинхронных двигателей различной конструкции показывает, что у двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора благодаря «сквозной» конструкции и уменьшенному диаметру ротора постоянная времени $T_{\text{эм}}$ меньше, чем у двигателей с полым немагнитным ротором

(исключение составляют двигатели с полым немагнитным ротором, работающие на частоте переменного тока 50 Гц).

Напряжение трогания у двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора в несколько раз больше, чем у двигателей с полым немагнитным ротором, так как в двигателях с короткозамкнутым ротором возникает сила одностороннего магнитного притяжения ферромагнитного сердечника ротора к сердечнику статора. Причина возникновения этой силы — возможная неравномерность воздушного зазора.

17.5.1. Исполнительные асинхронные двигатели, выпускаемые промышленностью

Исполнительные асинхронные двигатели, рассчитанные на частоту 400 Гц, применяют в автоматических устройствах специального назначения, а на частоту 50 Гц — в устройствах общего назначения.

В приборных устройствах общего назначения наиболее широко используют асинхронный редукторный двигатель РД-09. Ротор этого двигателя короткозамкнутый, а статор имеет восемь зубцов, на каждом из которых расположена катушка — четыре катушки образуют обмотку возбуждения, а четыре (через одну) — обмотку управления. Последовательно с обмоткой возбуждения включают конденсатор емкостью 1 мкФ. Номинальная частота вращения ротора (до редуктора) 1200 об/мин. Потребляемая двигателем мощность 14 Вт, масса 0,95 кг. Редуктор двигателя может иметь разные значения передаточных отношений. При заказе двигателя необходимо указать требуемую частоту вращения выходного вала (табл. 17.10). На рис. 17.12 пока-

Таблица 17.10. Технические данные исполнительных асинхронных двигателей

Типоразмер	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$f, \text{Гц}$	$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$	Частота вращения синхронная, об/мин	Примечание
ДКИ-1-12ТВ	36, 115	400	1	12 000	—
ДКИ-1-12ТВ	36, 115	400	2,5	12 000	—
ДКИ-1-12ТВ	36, 115	400	6	12 000	—
ДКИ-1,6-ЗАТ	220, 127	50	1,6	1500	—
ДМКР-1-20	36, 48	400	1	17,6 (не менее)	Редукторный
ДМКР-1-50	36, 48	400	1	44 (не менее)	То же
РД-09	127, 220	50	1	185; 77; 31; 15,5; 8,7; 4,5; 2,5; 1,8	»

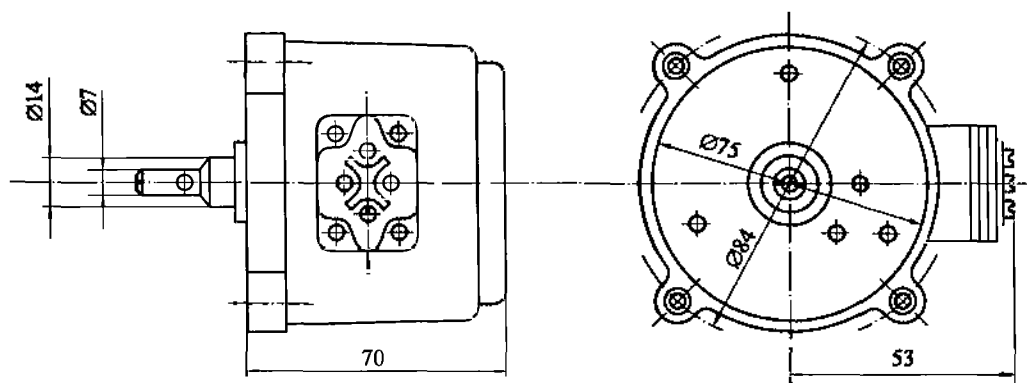


Рис. 17.12. Габаритные и установочно-присоединительные размеры исполнительного асинхронного редукторного двигателя РД-09

заны внешний вид и габаритные размеры двигателя РД-0,9. Крепление двигателя фланцевое.

17.6. Синхронные двигатели для привода механизмов приборных устройств

Для приводов механизмов приборных устройств и средств автоматизации, требующих стабильной (не зависящей от нагрузки) частоты вращения, применяют синхронные двигатели малой мощности (микродвигатели)

с возбуждением постоянными магнитами и реактивные (см. гл. 12).

Наибольшее применение получили редукторные двигатели. Такой двигатель состоит из собственно электродвигателя и пристроенного к нему в общем корпусе механического редуктора. Достоинство редукторных двигателей состоит в том, что они имеют небольшую частоту вращения выходного вала при значительном вращающем моменте.

В приборных и средствах промышленной автоматики широко применяют синхронные редукторные двигатели типов СД-54, ДСР-2 и ДСОР-32.

Двигатель СД-54 — синхронный реактивный конденсаторный редукторный двигатель; ротор явнополусный с короткозамкнутой пусковой клеткой; напряжение питания однофазное 127 или 220 В, частотой 50 Гц; режим работы продолжительный S1; номиналь-

ная мощность 0,7 Вт; частота вращения выходного (после редуктора) вала (об/мин) по желанию заказчика возможна: 2,24; 3,14; 5,59; 10,94; 19,59; 24; 38,4; 60; 96. Внешний вид и габаритные размеры двигателя СД-54 такие же, как и у двигателя РД-0,9 (см. рис. 17.12).

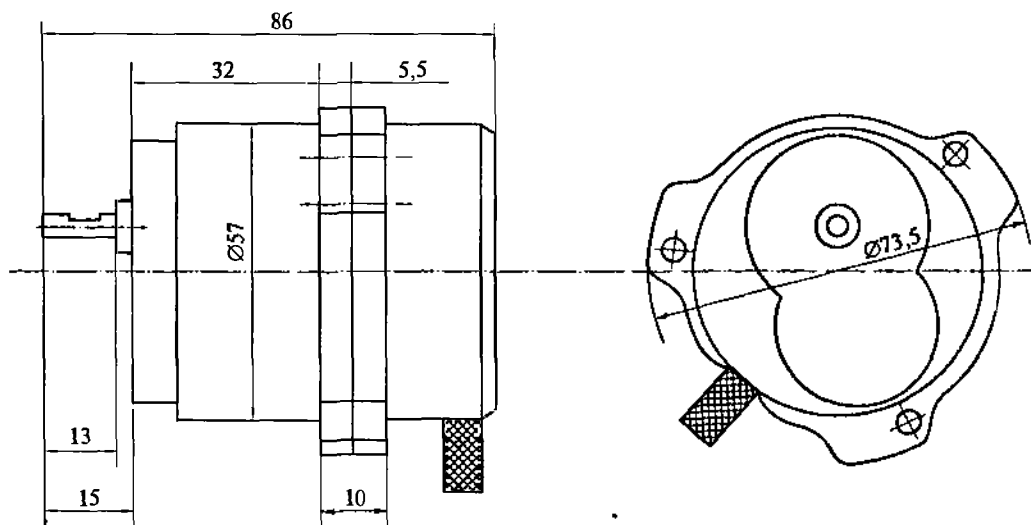


Рис. 17.13. Габаритные и установочно-присоединительные размеры редукторного двигателя ДСР-2

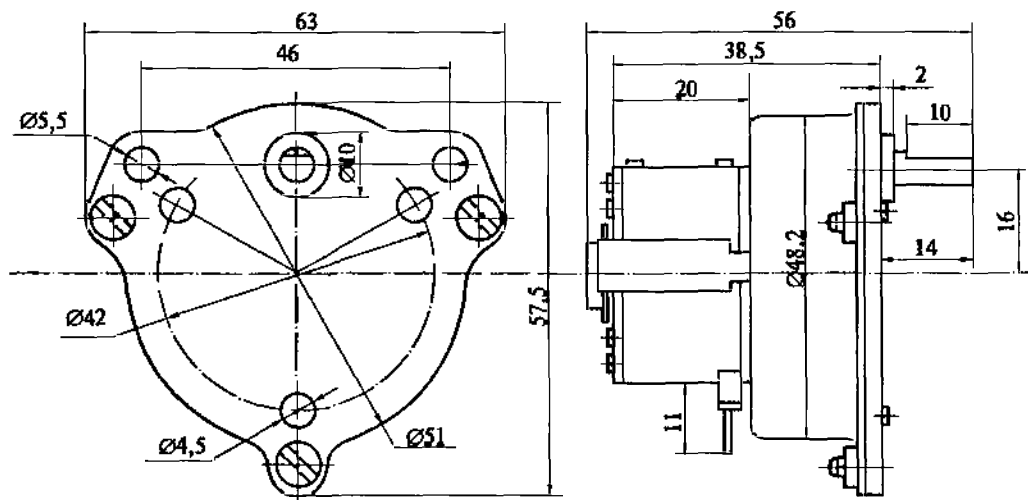


Рис. 17.14. Габаритные и установочно-присоединительные размеры синхронного редукторного двигателя ДСОР-32

Таблица 17.11. Технические данные синхронных редукторных двигателей типа ДСОР-32

Типоразмер	Частота тока, Гц	Номинальный вращающий момент, Н · м	Частота вращения, об/мин
ДСОР-32-0,4-60	50; 60	0,4	60
ДСОР-32-0,32-72	60	0,32	72
ДСОР-32-10-2	50; 60	10	2
ДСОР-32-10-2,4	60	10	2,4
ДСОР-32-25-0,2	50; 60	25*	0,2
ДСОР-32-30-1/300	50; 60	30*	1/300

* Прочность зубчатого зацепления ограничена.

Двигатель ДСР-2 — синхронный гистерезисный редукторный двигатель, изготавливается в трехфазном и однофазном конденсаторном вариантах; напряжение питания 220 В, частотой 50 Гц; частота вращения выходного (после редуктора) вала 2 об/мин. Внешний вид, габаритные и установочно-присоединительные размеры представлены на рис. 17.13.

Двигатели ДСОР-32 — синхронные редукторные, рассчитанные для работы от однофазной сети переменного тока частотой 50 или 60 Гц, напряжением 12, 24, 40, 110, 127, 220 В; потребляемая мощность 2,7 Вт. Ротор двигателя представляет собой кольцевой постоянный магнит, расположенный на стальном валике. На наружной поверхности магнита методом намагничивания образовано 16 полюсов.

Двигатели применяют в промышленных приборах и средствах автоматизации, в бытовых электроприборах.

На рис. 17.14 показаны, габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателей типа ДСОР-32, а в табл. 17.11 приведены технические данные этих двигателей.

17.7. Исполнительные шаговые двигатели

Исполнительные шаговые двигатели преобразуют электрический управляющий сигнал в дискретное (скачкообразное) угловое перемещение выходного вала, называемое *угловым шагом*. По принципу работы шаговые двигатели являются синхронными, так как электромагнитный момент, действующий на их ротор, создается силами магнитного притяжения полюсов статора и ротора.

Шаговые двигатели получили наибольшее применение в автоматизированном программном электроприводе, например в станках с числовым управлением. Используются шаговые двигатели с пассивным (невозбужденным) и активным (возбужденным) ротором.

Шаговые двигатели с пассивным ротором. Такие двигатели называют реактивными. Статор реактивного трехфазного шагового двигателя, представленного на рис. 17.15, имеет шесть явно выраженных полюсов (по два полюса на фазу), а ротор — два выступа (невозбужденных полюса). Оси полюсов статора сдвинуты в пространстве от-

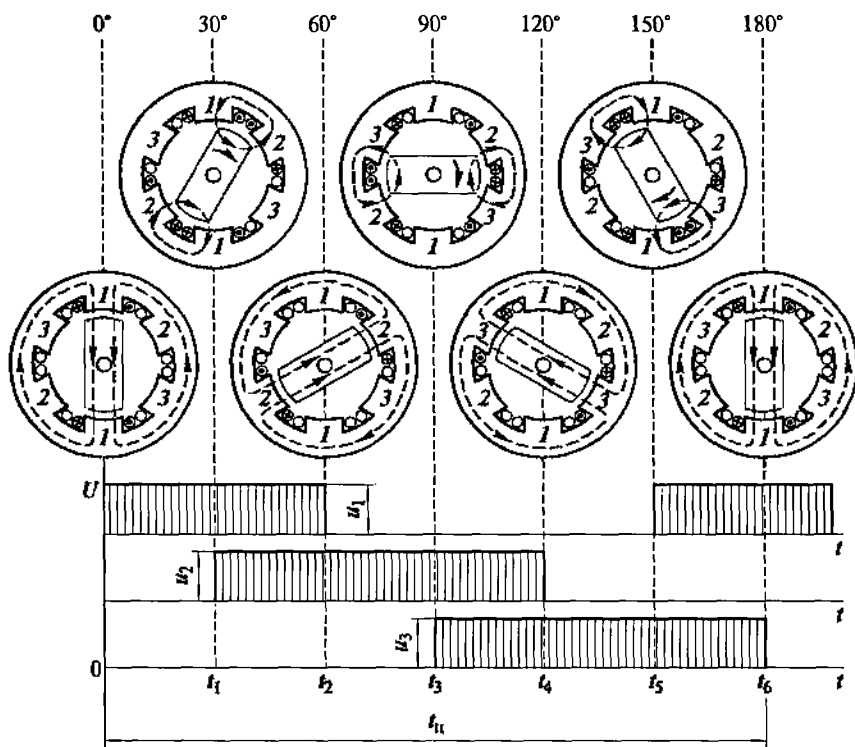


Рис. 17.15. К принципу действия реактивного шагового двигателя

носительно друг друга на угол 60° . При подаче импульса напряжения u_1 на обмотку фазы 1 в обмотке этой фазы статора проходит импульс тока i_1 . При этом ротор занимает положение, при котором его ось совмещается с осью 1—1 полюсов статора. В момент времени t_1 импульс напряжения u_2 создаст в фазе 2 статора импульс тока i_2 . При этом ротор, под действием сил магнитного притяжения, обусловленных одновременным намагничиванием полюсов 1—1 и 2—2 статора, повернется на угол $\alpha_{ш} = 30^\circ$. В момент времени t_2 импульс тока в фазе 1 прекратится, и ротор, совершив еще один шаг $\alpha_{ш} = 30^\circ$, займет положение по оси 2—2. В момент t_3 появится импульс тока в фазе 3 и ротор, повернувшись на 30° , займет среднее положение между по-

люсами 2—2 и 3—3. Суммарный угол поворота ротора составит 90° . В моменты времени t_4 , t_5 и t_6 ротор также будет совершать угловые шаги по 30° и в конце цикла займет положение по оси полюсов статора 1—1, совершив половину оборота (180°).

В последующие циклы подачи на обмотку статора управляющих импульсов напряжения u_1 , u_2 и u_3 процессы в шаговом двигателе будут повторяться. Рассматриваемый двигатель работает по шеститактной схеме коммутации с *раздельно-совместным* включением обмоток фазы:

$$1 \rightarrow (1 + 2) \rightarrow 2 \rightarrow (2 + 3) \rightarrow 3 \rightarrow \\ \rightarrow (3 + 1) \rightarrow 1 \text{ и т.д.}$$

Реактивные шаговые двигатели работают от однополярных импульсов,

так как изменение полярности импульса не меняет направления сил, действующих на невозбужденный ротор. Чтобы изменить направление вращения ротора (реверс) шагового двигателя, необходимо поменять схему коммутации обмоток статора, например, принять

$$1 \rightarrow (1 + 3) \rightarrow 3 \rightarrow (3 + 2) \rightarrow 2 \rightarrow \\ \rightarrow (2 + 1) \text{ и т. д.}$$

Если в рассматриваемом двигателе принять схему коммутации с раздельным включением обмоток статора: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ и т. д., то угловой шаг реактивного шагового двигателя с электромагнитной редукцией двигателя увеличится в два раза: $\alpha_{ш} = 60^\circ$. В общем случае угловой шаг двигателя

$$\alpha_{ш} = \frac{360^\circ}{2p_2 m_1 k_{\phi 1}},$$

где $2p_2$ — число полюсных выступов на роторе; m_1 — число фаз обмотки статора; $k_{\phi 1}$ — коэффициент, зависящий от способа включения фаз обмотки статора (при раздельном включении $k_{\phi 1} = 1$, при раздельно-совместном $k_{\phi 1} = 2$).

Уменьшение углового шага $\alpha_{ш}$ повышает быстродействие шагового двигателя. При этом сокращается время на перемещение ротора при отработке сигнала и увеличивается точность работы шагового двигателя. Для уменьшения углового шага $\alpha_{ш}$ увеличивают число полюсных выступов на роторе $2p_2$. Если в рассматриваемом двигателе применить ротор крестообразного сечения с $2p_2 = 4$, то при раздельно-совместном включении обмоток фаз статора угловой шаг уменьшится вдвое: $\alpha_{ш} = 15^\circ$. Дальнейшее уменьшение шага возможно при использовании в двигателе принципа электромагнитной редукции скорости.

На полюсных наконечниках статора и на поверхности цилиндрического ротора делают открытые пазы, придавая поверхностям этих элементов гребенчатую форму. Пазы на статоре и роторе выполняют с одинаковым шагом. На рис. 17.16 показана конструкция шагового двигателя с числом полюсов на статоре $2p = 8$ и числом пазов на цилиндрическом роторе $Z_2 = 36$. При этом на каждом полюсном наконечнике сделано 2 паза, так что число пазов на статоре $Z_1 = 2 \cdot 8 = 16$. Угловой шаг этого двигателя $\alpha_{ш} = 2,5^\circ$. Возможно и дальнейшее уменьшение шага.

Недостаток реактивных шаговых двигателей с электромагнитной редукцией — небольшой вращающий момент. Основной недостаток шаговых двигателей с пассивным ротором — отсутствие фиксации ротора при снятии управляющего сигнала.

Один из основных параметров шаговых двигателей — *частота приема частоты* $f_{пр}$, представляющая собой наибольшую частоту следования управляющих импульсов, при которой ротор двигателя втягивается в синхронизм с места без потери шага.

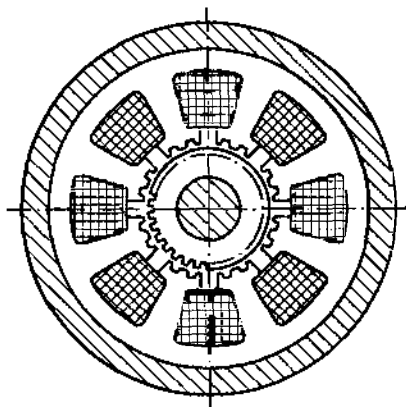


Рис. 17.16. Устройство реактивного шагового двигателя с редукцией скорости

Частота приемистости зависит от нагрузки на вал шагового двигателя: в режиме холостого хода наибольшая частота приемистости $f_{\text{пр max}}$, а с появлением нагрузки она уменьшается. Частота приемистости при номинальной нагрузке реактивных шаговых двигателей $f_{\text{пр ном}} = 1000 - 1200$ Гц. При увеличении углового шага частота приемистости уменьшается.

Шаговый двигатель работает совместно с электронным коммутатором, преобразующим заданную последовательность управляющих импульсов в m_1 -фазную систему импульсов напряжения прямоугольной формы.

Шаговые двигатели с активным ротором. Ротор такого двигателя выполнен из постоянного магнита, а статор — такой же, как у реактивных шаговых двигателей, т.е. с сердечником с явно выраженными полюсами и многофазной обмоткой. В шаговом двигателе с активным ротором можно применять двухполярные импульсы напряжения, так как с изменением

направления тока в обмотке фазы статора меняется магнитная полярность соответствующих полюсов. Так как ротор двигателя намагничен, то изменение полярности полюсов статора вызывает изменение направления сил взаимодействия между полюсами статора и ротора.

Рассмотрим принцип действия двухфазного двигателя с двухполюсным постоянным магнитом на роторе и четырьмя явно выраженными полюсами на статоре (рис. 17.17).

При подаче импульса напряжения положительной полярности ($+u_1$) в обмотку первой фазы два полюса этой фазы приобретают магнитную полярность, как показано на рис. 17.17, а, при этом ротор занимает вертикальное положение по оси $I-I$, обусловленное направлением сил взаимного притяжения полюсов статора и ротора разноименной полярности. В момент времени t_1 импульс в первой фазе прекращается и поступает положительный импульс ($+u_2$) во вторую фазу.

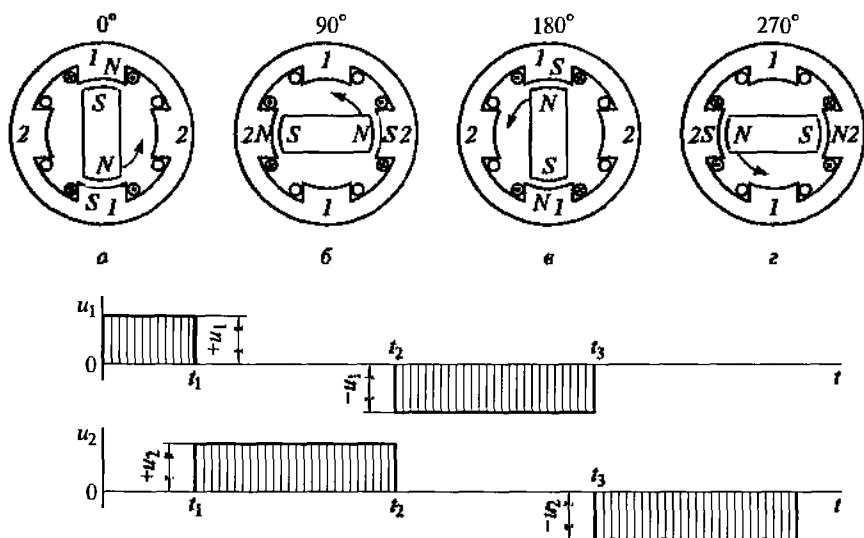


Рис. 17.17. К принципу действия шагового двигателя с активным ротором

При этом обмотка первой фазы обес-
точивается, а полюса второй фазы
приобретают магнитную полярность,
как показано на рис. 17.17, б. В резуль-
тате ротор поворачивается против ча-
совой стрелки на $\alpha_{ш} = 90^\circ$. В момент
времени t_2 на обмотку первой фазы
подаётся импульс напряжения отри-
цательной полярности ($-u_2$), а с об-
мотки второй фазы импульс напряже-
ния снимается. В результате полюса
этой фазы приобретут полярность, как
показано на рис. 17.17, в, и ротор повер-
нется против часовой стрелки ещё на
 90° . Затем, в момент времени t_3 , им-
пульс напряжения отрицательной по-
лярности поступит в обмотку второй
фазы и ротор повернется ещё на 90°
(рис. 17.17, г). При подаче импульса
напряжения ($+u_1$) на обмотку первой
фазы ротор заканчивает полный обо-
рот и занимает исходное положение
(см. рис. 17.17, а). Работа шагового
двигателя соответствует коммутации с
раздельным включением обмоток фаз
и разнополярными импульсами на-
пряжения $(+u_1) \rightarrow (+u_2) \rightarrow (-u_1) \rightarrow$
 $\rightarrow (-u_2) \rightarrow (+u_1)$ и т.д. Если в рассмот-
ренном двигателе применить коммута-
цию с раздельно-совместным включе-
нием обмоток фаз, то шаговый дви-
гатель будет работать с угловым шагом
 $\alpha_{ш} = 45^\circ$, при этом вращающий момент
на роторе возрастет примерно в 1,5 раза.

Шаговые двигатели с активным ро-
тором работают также с однополяр-
ными импульсами напряжения (что
упрощает конструкцию коммутатора),
но при этом число обмоток фазы на
статоре (и число полюсов) увеличи-
вается. По сравнению с реактивными
шаговыми двигателями шаговые дви-
гатели с активным ротором создают
большие вращающие моменты, обес-
печивают фиксацию ротора при сня-
тии управляющего сигнала.

Недостаток двигателей с активным
ротором — большой угловой шаг ($15—$
 90°). Это объясняется технологически-
ми трудностями изготовления ротора
с постоянными магнитами при боль-
шом числе полюсов. Для уменьшения
углового шага увеличивают число фаз
в обмотке статора или применяют
двухстаторную конструкцию. Двухста-
торные двигатели имеют два одина-
ковых сердечника статора с одинако-
выми обмотками, на валу размещены
два ротора, при этом сердечники ста-
торов смещены относительно друг дру-
га на половину зубцового деления (ро-
торы расположены соосно). Недоста-
ток таких двигателей — сложность из-
готовления.

Стремление удовлетворить разнооб-
разные требования, предъявляемые к
исполнительным шаговым двигателям,
привело к созданию специальных ша-
говых двигателей — линейных, вол-
новых, с катящимся ротором и т.п.

Рассматривая принцип действия
шагового двигателя, влияние нагрузоч-
ного момента на валу двигателя не учи-
тывалось. Если на вал шагового дви-
гателя действует статический нагрузоч-
ный момент M_c , то при переключении
управляющего импульса с одной фазы
на другую вектор МДС статора повер-
нется на угол $\alpha_{ш}$, ротор двигателя,
поворачиваясь за вектором МДС, бу-
дет отставать от него на угол θ_c , на-
зываемый *углом статической ошибки*
шагового двигателя, эл. град:

$$\theta_c = \arcsin \frac{M_c}{M_{\max}},$$

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

Быстродействие шаговых двигате-
лей определяется скоростью протека-

ния электромагнитных процессов при переключении управляющих импульсов напряжения с одной обмотки фазы статора на другую. Скорость протекания процессов оценивается электромагнитной постоянной времени, с,

$$T_z = \frac{L_\Phi}{r_\Phi},$$

где L_Φ — индуктивность обмотки фазы статора, Гн; r_Φ — активное сопротивление обмотки фазы, Ом.

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

$$T_z = \frac{L_\Phi}{r_\Phi + R_{доб}}.$$

Энергетическим показателем шагового двигателя является потребляемая мощность P_l .

Частота вращения шаговых двигателей регулируется изменением частоты подачи управляющих импульсов напряжения на обмотку статора, в зависимости от которой меняются режимы работы шаговых двигателей: статический, квазистатический, установившийся и переходные.

Статический режим — режим, при котором по обмоткам фаз статора проходит постоянный ток, создающий неподвижное в пространстве магнит-

ное поле. При этом ротор двигателя находится в состоянии статического равновесия, а прикладываемый к валу нагрузочный момент отклоняет ротор в ту или иную сторону от уравновешенного состояния на угол θ_c , т. е. на угол статической ошибки.

Квазистатический режим — режим работы шагового двигателя при единичных угловых шагах, когда к началу последующего шага все переходные процессы, связанные с отработкой предыдущего шага, полностью заканчиваются. Для обеспечения требуемой частоты отработки шагов в квазистатическом режиме применяют различные способы торможения ротора.

Установившийся режим — режим, соответствующий постоянной частоте следования управляющих сигналов. Ротор двигателя в этом режиме имеет постоянную частоту вращения, однако при переходе из одного установившегося состояния в другое могут возникать колебания ротора. Характер колебаний ротора зависит от соотношения между частотой следования управляющих сигналов f_y и частотой собственных колебаний ротора f_0 : если $f_y < f_0$, то возникают свободные колебания ротора с частотой f_0 , если $f_y > f_0$, то появляются вынужденные колебания ротора с частотой f_y ; если $f_y = f_0$ или f_y/f_0 — целое число, то возникает элек-

Таблица 17.12. Технические данные исполнительных шаговых двигателей

Типоразмер	$U_{ном}$, В	$M_{ном}$, Н·м	Приемистость, шаг/с	I , А	α_m , град	Диаметр корпуса, мм	Масса, кг
ДШР-39	12	0,006	1000	0,2	1,8	39	0,22
ДШР-46	12	0,0025	700	0,2	1,8	46	0,08
ДШР-57	220	0,06	500	1,5	1,8	57	0,39
ДШМ-36	27	0,0088	50	0,56	10	36	0,5
ДШР-80	48	0,1	2000	3,0	1,5	80	2,5
ДШ-48	12	0,006	1000	0,2	1,8	48	0,13

Таблица 17.13. Технические данные исполнительных волновых шаговых двигателей ДВШ

Типоразмер	$U_{\text{ном}}$, В	$M_{\text{ном}}$, Н·м	Приемистость, шаг/с	I , А	$\alpha_{\text{ш}}$, град	Диаметр корпуса, мм	Масса, кг
ДВШ50-0,04-0,5	12	0,04	1300	1,15	0,5	50	0,55
ДВШ50-0,04-0,25	12	0,04	2500	1,2	0,25	50	0,55
ДВШ200-16-4096	27	30*	200	5	0,088	200	16

* Момент, создаваемый спаркой из двух двигателей, расположенных зеркально в одном корпусе.

тромеханический резонанс, который при недостаточном демпфировании ротора приводит к нарушению работы шагового двигателя и выпадению его из синхронизма.

Технические данные некоторых исполнительных шаговых двигателей приведены в табл. 17.12.

Стремление получить шаговый двигатель с повышенным значением вращающего момента (при малом шаге) привело к созданию волновых шаговых двигателей серии ДВШ, представляющих собой сочетание шагового двигателя с волновой передачей (табл. 17.13).

17.8. Гироскопические двигатели

Гироскопический двигатель (гиродвигатель) является основным элементом гироскопических приборов. Такие приборы применяют в навигационных, регулирующих и стабилизирующих устройствах, получивших широкое распространение в авиации, космонавтике, судовождении и т.д.

Основной элемент гироскопического прибора — *гироскоп*, который состоит из быстро вращающегося динамически симметричного твердого тела (ротора) и подвеса, обеспечивающего две или три степени свободы. На рис. 17.18 изображен гироскоп с тремя степенями свободы: ротор I ус-

тановлен на карданном подвесе и может вращаться относительно трех осей: основной оси вращения ротора AB , оси DE при повороте внутренней рамки 2, относительно рамки 3. Последняя, в свою очередь, может поворачиваться вокруг оси GK относительно основания гироскопа 4. Будучи приведенным в быстрое вращение, ротор I стремится сохранять неизменным в пространстве положение своей оси вращения AB . Чем больше частота вращения ротора и больше его момент инерции, тем устойчивей положение оси вращения ротора. Большая частота вращения ротора гиродвигателя обеспечивается его питанием от источника переменного тока повышенной частоты (от 400 до 2000 Гц). Что же касается значительного момента инерции ротора, то он создается благода-

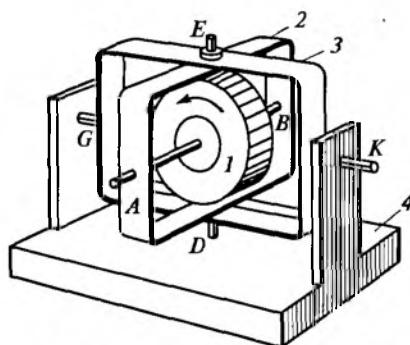


Рис. 17.18 Гироскоп в кардановом подвесе

ря обращенной конструкции гиродвигателя, при которой ротор является внешним элементом двигателя. В этом случае наружный диаметр ротора не ограничивается размерами статора, как это имеет место при традиционной конструкции двигателя.

Момент инерции J ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$) вращающегося полого цилиндра массой m (кг), в данном случае ротора с наружным диаметром $D_{\text{нар}}$ и внутренним диаметром $D_{\text{вн}}$ (м), равен

$$J = m(D_{\text{нар}}^2 + D_{\text{вн}}^2)/8.$$

Асинхронный гиродвигатель с внешним ротором (рис. 17.19) имеет статор 4 с трехфазной обмоткой 6, маховик 7, во внутрь которого запрессован сердечник ротора 5 с короткозамкнутой обмоткой 8. Маховик жестко насажен на вал 10, вращающийся в радиально-упорных шарикоподшип-

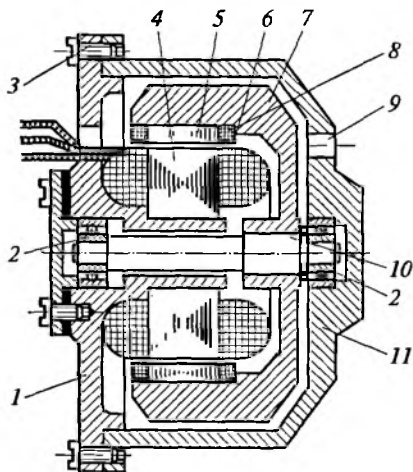


Рис. 17.19. Асинхронный однодвигатель:

1 — подшипниковый щит; 2 — подшипники; 3 — винт; 4 — сердечник статора; 5 — сердечник ротора; 6 — обмотка статора; 7 — маховик; 8 — короткозамкнутая обмотка ротора; 9 — вентиляционное отверстие; 10 — вал; 11 — защитный кожух

никах 2. Статор крепится на выступе подшипникового щита 1, который винтами 3 прикреплен к защитному кожуху 11, имеющему вентиляционные отверстия 9.

Недостаток рассмотренной конструкции гиродвигателя, называемого *однодвигательным*, является его несимметричность, обусловленная несовпадением места крепления маховика к валу с центром его тяжести. При изменении температуры нагрева отдельных элементов это может вызвать вибрацию маховика и нестабильную работу гиродвигателя, поэтому для гироскопов высокой точности применяют двухстаторные асинхронные гиродвигатели с симметричным ротором (рис. 17.20).

Для уменьшения трения гиродвигатель обычно помещают в герметичную оболочку, заполненную гелием или водородом.

Несмотря на то, что в асинхронных гиродвигателях применяют ротор с глубокими пазами (см. 4.7), обеспечивающий повышенное значение пускового момента, процесс пуска остается наиболее тяжелым периодом. Поэтому время разбега ротора асинхронных гиродвигателей сравнительно велико.

С целью сокращения времени пуска в некоторых гироскопах иногда применяют синхронные гистерезисные гиродвигатели, отличающиеся хорошими пусковыми свойствами и легкостью вхождения в синхронизм (см. 12.4). Применение синхронных двигателей с постоянными магнитами в качестве гиродвигателей не оправдано из-за трудности вхождения этих двигателей в синхронизм при высокой частоте вращения.

Гиродвигатели постоянного тока, хотя и имеют меньшее время разгона,

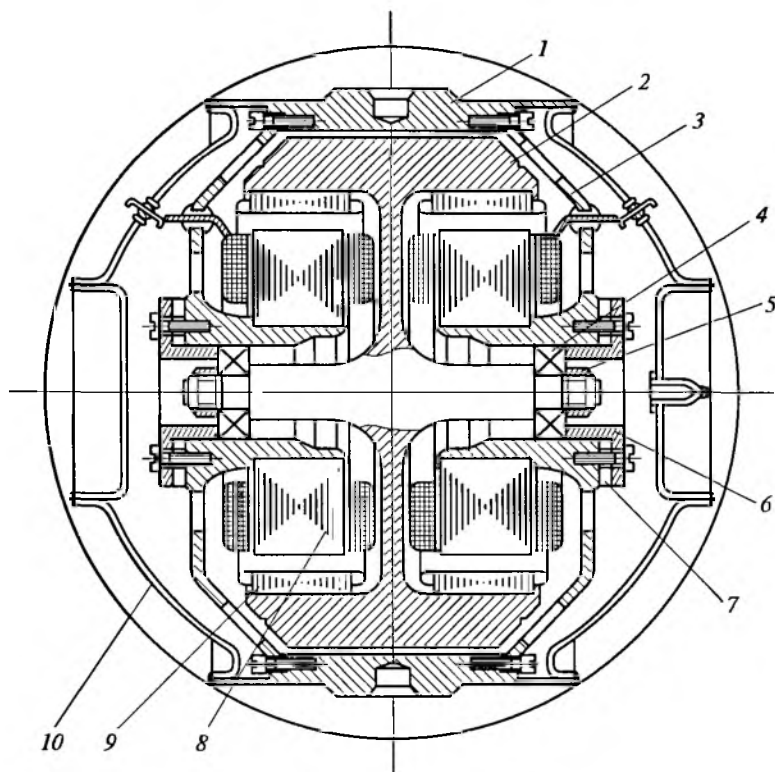


Рис. 17.20. Асинхронный двухстаторный гиродвигатель:

1 — корпус; 2 — маховик; 3 — подшипниковый щит; 4 — шарикоподшипник; 5 — гайка; 6 — фланец; 7 — шайба; 8 — статор; 9 — сердечник ротора; 10 — герметичный кожух

но применение их ограничено из-за наличия щеточно-коллекторного узла, работа которого при весьма больших частотах вращения сопровождается искрением. Кроме того, эти двигатели создают радиопомехи и являются источником пожаро- и взрывоопасности.

17.9. Электродвигатели привода считывающих устройств

Для хранения программ и данных, используемых в автоматизированном электроприводе, используют различного рода накопители памяти. Такой

накопитель можно рассматривать как совокупность носителя памяти и считывающего устройства с электроприводом.

Накопители памяти представляют собой различные запоминающие устройства определенного принципа действия с физическими и эксплуатационно-техническими характеристиками. Основным свойством и назначением запоминающих устройств является возможность хранения и воспроизведения информации. Запоминающие устройства принято делить на виды и категории в связи с их принципами функционирования, эксплуатационно-техническими характерис-

тиками. В настоящее время наибольшее применение получили магнитные и оптические носители информации. Магнитные носители большого объема информации применяют обычно в виде магнитных лент, а оптические — в виде лазерных дисков. Для считывания информации, хранящейся в носителях памяти, применяют считывающие устройства, неизменным элементом которого является электропривод. Конструкция электропривода считывающего устройства определяется видом носителя информации.

17.9.1. Лентопротяжные механизмы

Лентопротяжный механизм — это основной узел устройств для записи и считывания информации, используемой в качестве носителя информации. Лентопротяжные механизмы получили весьма широкое применение в различных приборных устройствах. Назначение лентопротяжного механизма — обеспечить равномерное перемещение магнитной ленты в процессе записи

или считывания информации, а также для ускоренной ее перемотки. Выполнение перечисленных функций лентопротяжного механизма может быть осуществлено либо одним, либо тремя двигателями.

Лентопротяжные механизмы с одним двигателем называют *одномоторными*, они имеют минимальные габариты и массу. Благодаря этим свойствам, такие механизмы применяют в переносных бытовых или репортерских магнитофонах с микрокассетами.

При повышенных требованиях к стабильности скорости протяжки ленты и надежности применяют *трехмоторные* лентопротяжные механизмы (рис. 17.21, а).

Кинематическая схема такого механизма значительно проще и надежнее одномоторного, поскольку подающий и приемные узлы имеют свои двигатели, что исключает применение в нем пассивков. Протягивание ленты со стабильной скоростью выполняется двигателем 4 с прижимным роликом 3. Стабильность частоты вращения

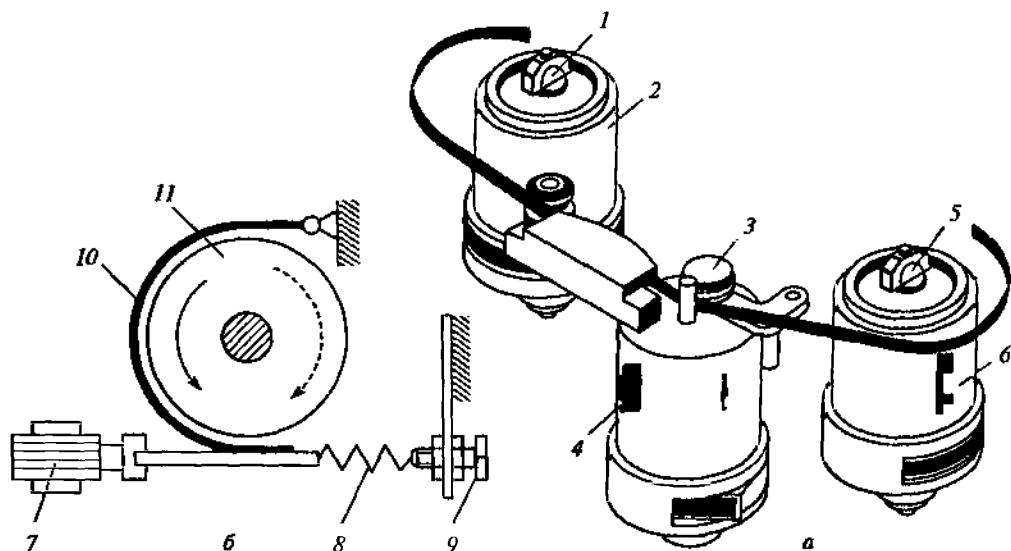


Рис. 17.21. Лентопротяжный механизм

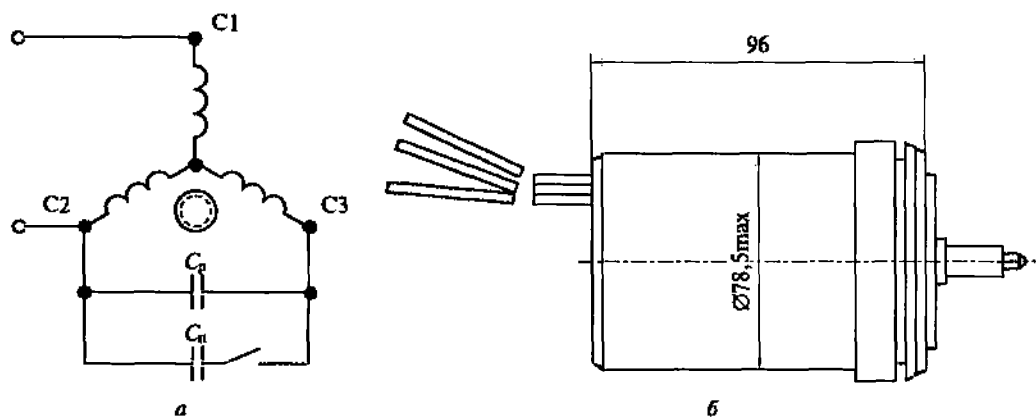


Рис. 17.22. Схема включения (а) и внешний вид (б) синхронного двигателя типа ДС-10-1500

этого двигателя обеспечивается его жесткой механической характеристикой. Обычно это синхронные двигатели с постоянными магнитами либо вентильные двигатели постоянного тока с управлением от электронного коммутатора. Для привода вала 1 узла, подающего магнитную ленту, применен двигатель 2, а для привода вала 5 приемного узла — двигатель 6. В качестве этих двигателей обычно используют асинхронные конденсаторные двигатели с мягкой механической характеристикой, чем обеспечивается наличие постоянно действующего момента натяжения ленты при ее подмотке на приемную кассету. Такая характеристика обеспечивается повышенным активным сопротивлением короткозамкнутой обмотки ротора этих двигателей. В режиме обратной перемотки ленты ролик 3 отжат и окружное усилие от двигателя 4 на ленту не передается. Для исключения свободного выбега двигателей, что нарушило бы работу лентопротяжного механизма при переключении режимов, все три двигателя снабжены ленточными тормозами (рис. 17.21, б). Пружина 8 с

регулирующим винтом 9 обеспечивает постоянное прижатие ленты 10 к тормозному диску 11. Отключение тормоза происходит при включении электромагнита 7, которое происходит одновременно с включением двигателя.

Для протягивания ленты с постоянной скоростью изготавливают однофазные синхронные прецизионные двигатели типа ДС-10-1500 мощностью 10 Вт, частотой вращения 1500 об/мин, с возбуждением постоянным магнитом, напряжение питания двигателя 220 В частотой 50 Гц. Двигатель имеет высокую стабильность частоты враще-

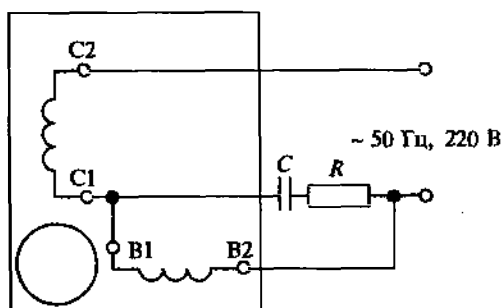


Рис. 17.23. Схема включения двигателя ДА-6-4/45МВ

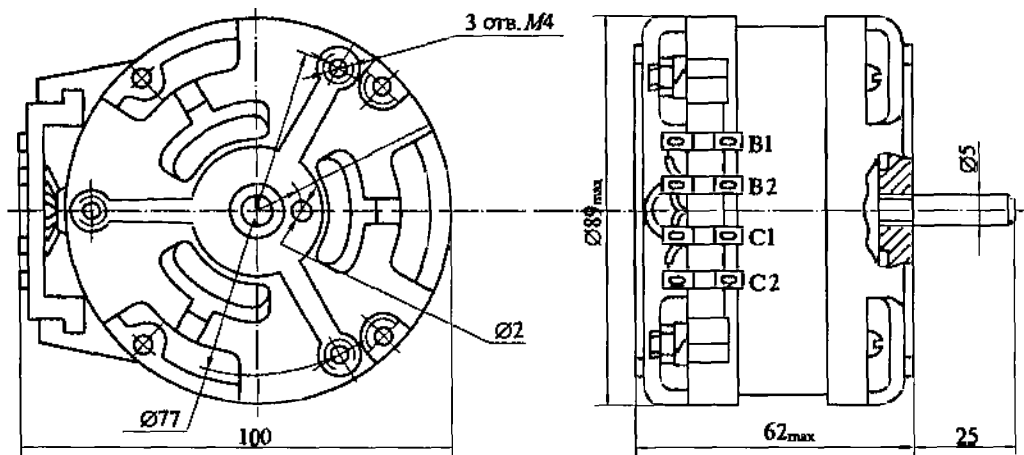


Рис. 17.24. Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателя ДА-6-4/45МВ

ния и низкий уровень акустических шумов. Исполнение двигателя закрытое необдуваемое. Схема включения двигателя представлена на рис. 17.22, а, а на рис. 17.22, б показан вид двигателя. Емкость рабочего конденсатора $C_p = 2$ мкФ, пускового — $C_n = 4$ мкФ; рабочее напряжение конденсаторов не менее 250 В.

В некоторых лентопротяжных механизмах для протягивания ленты применяют асинхронный конденсаторный двигатель типа ДА-6-4/45МВ с жесткой механической характеристикой. Номинальные данные двигателя: $P_{ном} = 6$ Вт; $n_{ном} = 1400$ об/мин; $I_{ном} = 0,13$ А. Схема включения двигателя представлена на рис. 17.23, а его габаритные и установочно-присоединительные размеры — на рис. 17.24. Двигатель включается в сеть напряжением 220 В частотой 50 Гц.

17.9.2. Электропривод устройств считывания информации с оптических дисков

Оптические диски называют также лазерными дисками или компакт-

дисками CD (Compact Disc). Диски изготавливают из алюминия, а на одну из сторон диска (активная сторона) наносят слой из отражающего материала со спиральной дорожкой. Наружный диаметр CD 120 мм, внутренний диаметр 15 мм, толщина 1,2 мм. При записи информации на такой диск ла-

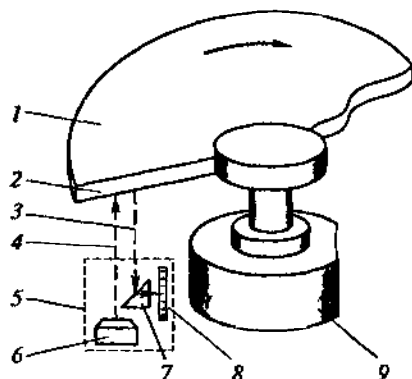


Рис. 17.25. Функциональная схема устройства для считывания информации с компакт-диска:

1 — компакт-диск; 2 — активная сторона диска; 3 — отраженный луч; 4 — лазерный луч; 5 — оптическая головка; 6 — лазер; 7 — призма; 8 — преобразователь световых импульсов в электрические импульсы; 9 — двигатель

зерный луч выжигает на этой дорожке микроскопические пятнышки (углубления), разделенные площадками, отражающими лазерный луч. Считывание информации с диска выполняется лазерным лучом меньшей мощности. На рис. 17.25 представлена функциональная схема, поясняющая процесс считывания информации с компакт-диска. От источника (лазера) 6, расположенного в оптической головке 5, лазерный луч 4 направляется на активную сторону 2 диска 1, где он проходит сквозь защитный слой, достигая отражающего слоя из алюминия. Отраженный луч 3 попадает на призму 7, которая направляет его на пла-

стину 8, преобразующую световые импульсы в электрические импульсы цифровой системы, как последовательность цифр 0 и 1. Вращение диска 1 осуществляется миниатюрным синхронным двигателем 9, устройство которого показано на рис. 17.26, управляемым электронным коммутатором.

Этот двигатель имеет обращенную конструкцию, т.е. его ротор 1 с постоянным магнитом 2 расположен снаружи, а статор с явно выраженными полюсами 3 — внутри. На полюсах статора, число которых равно 9, расположены полюсные катушки 4. Вал 6 двигателя своей нижней частью опи-

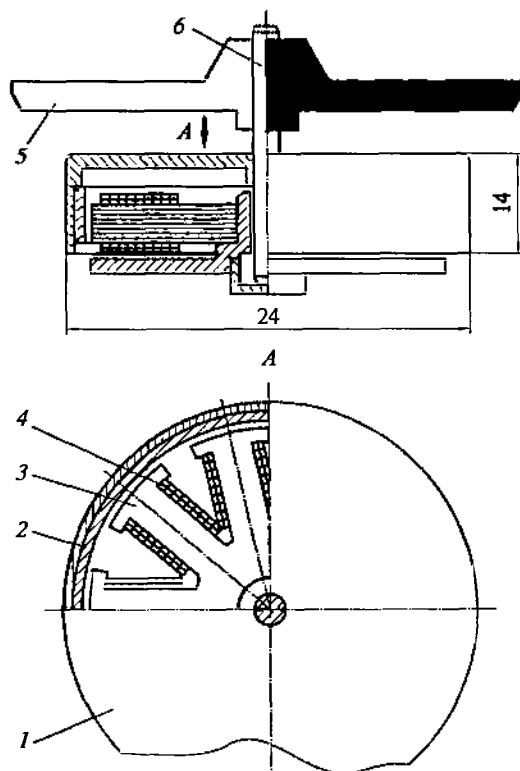


Рис. 17.26. Синхронный двигатель для вращения лазерного диска:

1 — ротор; 2 — постоянный магнит; 3 — полюс статора; 4 — полюсная катушка; 5 — планшайба;
6 — вал

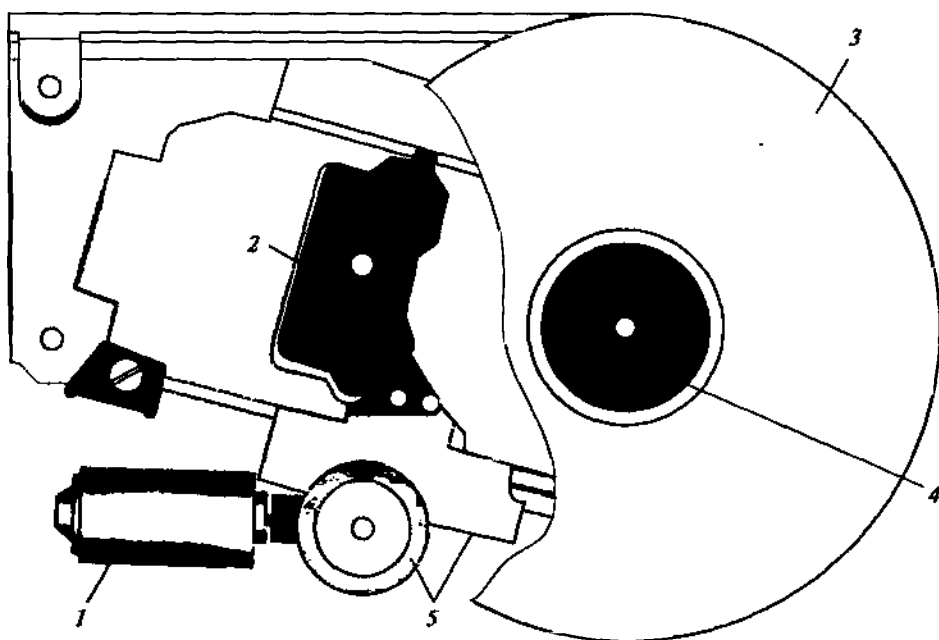


Рис. 17.27. Расположение основных элементов считывающего устройства:

1 — двигатель постоянного тока; 2 — оптическая головка; 3 — оптический диск (неактивная сторона); 4 — планшайба синхронного двигателя для вращения диска; 5 — реечная передача для радиального перемещения оптической головки

рается на подпятник, а на его верхней части укреплен планшайба 5, на которой размещается лазерный диск, приводимый двигателем во вращение. Оптическая головка 5 (см. рис. 17.25) в процессе считывания информации с диска перемещается радиально от центра к периферии диска. Это перемещение выполняет еще один мини-атюрный двигатель — коллекторный двигатель постоянного тока с постоянным магнитом. Вращательное движение этого двигателя преобразуется в поступательное движение посредством реечной передачи. На рис. 17.27 показано расположение основных элементов считывающего устройства: коллекторный двигатель постоянного тока 1 предназначен для радиального пе-

ремещения оптической головки 2, синхронный двигатель 4 служит для вращения диска 3, реечная передача 5 преобразует вращательное движение двигателя 1 в поступательное радиальное перемещение оптической головки 2. Информация, хранящаяся на лазерных дисках, в отличие от информации, находящейся на магнитной ленте, не подвержена воздействию электрических и магнитных полей. Кроме того, стоимость записи, хранения и считывания единицы информации на лазерном диске существенно меньше, чем на магнитной ленте. Из этого следует, что применение лазерных дисков в качестве носителей информации является весьма перспективным.

ГЛАВА 18

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

18.1. Тахогенераторы
постоянного тока

Тахогенераторы преобразуют частоту вращения какого-либо вала в электрический сигнал (выходное напряжение).

Зависимость выходного напряжения тахогенератора $U_{\text{вых}}$ от частоты вращения ротора (якоря) n определяется выходной характеристикой. Уравнение идеальной выходной характеристики тахогенератора:

$$U_{\text{вых}} = C_U n,$$

где C_U — крутизна выходной характеристики, определяющая чувствительность тахогенератора к изменениям частоты вращения, В/(об/мин).

Чем больше крутизна C_U , тем чувствительнее и точнее тахогенератор.

Тахогенераторы должны удовлетворять ряду требований. Выходная характеристика тахогенератора, представляющая собой зависимость напряжения на выходе $U_{\text{вых}}$ от частоты вращения n , должна максимально приближаться к прямой линии и иметь наибольшую крутизну. При этом на форму выходной характеристики практически не должны влиять внешние факторы (температура, влажность, давление и т. п.). Необходимо, чтобы напряжение на выходе тахогенератора при $n = 0$, называемое *остаточным*, было минимальным. Напряжение $U_{\text{вых}}$ должно быть симметричным (при вращении тахогенератора в разные стороны с одинаковой частотой значения его выходных напряжений должны быть одинаковы). При нарушении этого условия появляется *ошибка несимметрии* тахогенератора.

Необходимо, чтобы выходная мощность тахогенератора была достаточной для работы подключаемых к нему приборов. Кроме того, пульсация выходного напряжения тахогенератора, обусловленная электромагнитными процессами в нем, должна быть минимальной.

По принципу действия и устройству тахогенераторы бывают постоянного и переменного тока (асинхронные).

Тахогенератор постоянного тока — это коллекторная машина постоянного тока с независимым возбуждением или возбуждением постоянными магнитами, работающая в генераторном режиме. По конструкции он отличается от машин постоянного тока традиционной конструкции лишь весьма малыми габаритами.

На рис. 18.1 показаны принципиальные схемы тахогенераторов постоянного тока с электромагнитным возбуждением и возбуждением постоянными

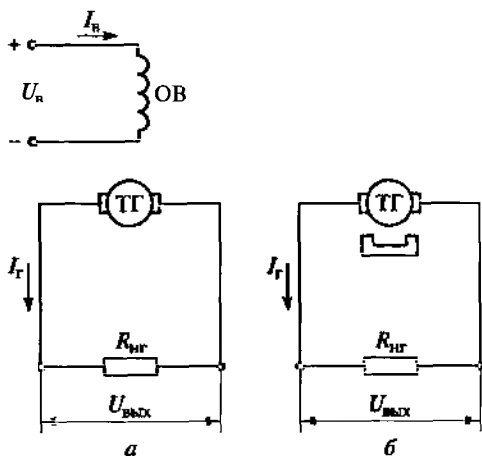


Рис. 18.1. Тахогенератор постоянного тока: а — с электромагнитным возбуждением; б — с возбуждением постоянными магнитами

магнитами. В случае электромагнитного возбуждения обмотку возбуждения ОВ подключают к источнику постоянного тока. Если якорь возбужденного тахогенератора привести во вращение с частотой n , то на его выходе появится постоянное напряжение, В,

$$U_{\text{вых}} = \frac{c_e \Phi n}{1 + \frac{r_a}{R_{\text{нг}}}} = C_U n, \quad (18.1)$$

где r_a — сопротивление обмотки якоря, Ом; $R_{\text{нг}}$ — сопротивление измерительного устройства (нагрузки), подключенного к тахогенератору, Ом; C_U — крутизна выходной характеристики тахогенератора, В/(об/мин):

$$C_U = \frac{c_e \Phi}{1 + \frac{r_a}{R_{\text{нг}}}}.$$

Выражение (18.1) является уравнением реальной выходной характеристики тахогенератора и представляет собой уравнение прямой линии. Из него следует, что чем больше сопротивление нагрузки $R_{\text{нг}}$, тем больше крутизна выходной характеристики C_U . Наибольшая крутизна выходной характеристики соответствует режиму холостого хода тахогенератора, когда обмотка якоря разомкнута, т. е. $R_{\text{нг}} = \infty$. С ростом тока нагрузки I_r или сниже-

нием сопротивления $R_{\text{нг}}$ крутизна выходной характеристики уменьшается (рис. 18.2, а).

Согласно приведенному выше уравнению, выходная характеристика тахогенератора постоянного тока — прямая линия. Однако опыт показывает, что выходная характеристика прямолинейна только в начальной части (при малых частотах вращения), а с ростом частоты вращения она становится криволинейной (см. рис. 18.2, а). Криволинейность характеристики усиливается при падении сопротивления нагрузки $R_{\text{нг}}$ и увеличении частоты вращения n . Это объясняется размагничивающим действием реакции якоря в тахогенераторе. Для уменьшения криволинейности выходной характеристики не следует использовать тахогенератор на его предельных частотах вращения и применять в качестве нагрузки приборы с малым внутренним сопротивлением. Магнитная система тахогенератора должна быть ненасыщенной, что ослабляет влияние реакции якоря и способствует сохранению прямолинейности выходной характеристики тахогенератора.

Другой причиной, вызывающей погрешность тахогенераторов постоянного тока, является падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{\text{щ}}$. По этой

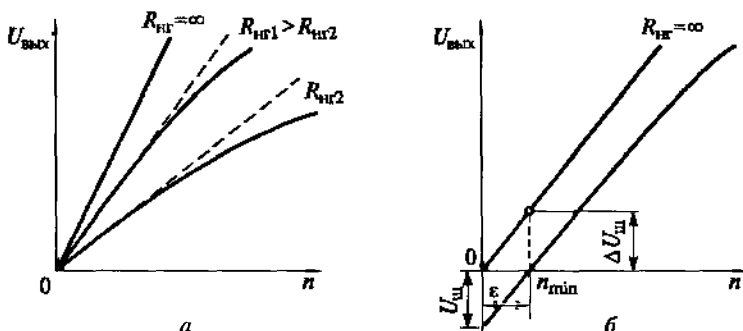


Рис. 18.2. Выходные характеристики тахогенераторов постоянного тока

Таблица 18.1. Технические данные тахогенераторов постоянного тока (возбуждение постоянным магнитом)

Типоразмер	C_U , мВ/(об/мин)	$R_{\text{иг}}$, 10^3 Ом	$n_{\text{ном}}$, об/мин	Класс точности	Масса, кг
1,6ТГП-2	2,5	10	3000	0,5	0,025
2,5ТГП-4	4,0	6	3000	1,0	0,09
ТГП-5	4,0	10	6000	0,2	0,09
ТП20-6-0,5	6,0	10	3000	0,5	0,05
ТП20-4-0,2	4,0	10	6000	0,2	0,05
ТП20-4-1	4,0	6	3000	1,0	0,05

причине характеристика выходит не из начала осей координат, а из точки, отстоящей от начала координат на величину $\varepsilon = n_{\text{мин}}$ (рис. 18.2, б).

Достоинства тахогенераторов постоянного тока — малые габариты и масса при значительной выходной мощности; возможность применения возбуждения постоянными магнитами, что позволяет обойтись без источника питания для возбуждения тахогенератора.

Недостатки — наличие скользящего щеточно-коллекторного контакта, что снижает эксплуатационную надеж-

ность и вносит дополнительную погрешность. Но несмотря на перечисленные недостатки, тахогенераторы постоянного тока, особенно с возбуждением постоянными магнитами, получили весьма широкое распространение в электроприводе. Например, часто применяются тахогенераторы серии ТГП с возбуждением от постоянного магнита, предназначенные для использования в системах автоматического регулирования в качестве датчиков обратной связи, а также для измерения частоты вращения вращающихся элементов машин и приборов (табл. 18.1).

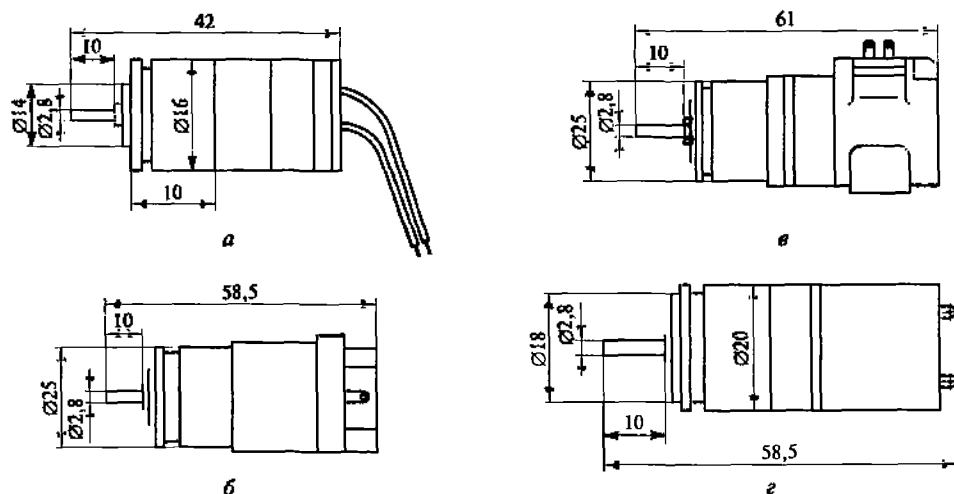


Рис. 18.3. Габаритные и установочно-присоединительные размеры тахогенераторов:

а — 1,6ТГП-2; б — 2,5ТГП-4; в — ТГП-5; г — ТП20-6-0,5; ТП20-4-0,2; ТП20-4-1

Габаритные и установочно-присоединительные размеры этих тахогенераторов представлены на рис. 18.3.

18.2. Асинхронные тахогенераторы

Асинхронный тахогенератор представляет собой двухфазную асинхронную машину весьма малой мощности, работающую в режиме генератора. Одна из обмоток статора, называемая обмоткой возбуждения ОВ, включена в сеть переменного тока (рис. 18.4, а), а с зажимов другой обмотки, называемой генераторной ОГ, снимается напряжение $U_{\text{вых}}$. Величина этого напряжения пропорциональна частоте вращения ротора тахогенератора n .

Свойства тахогенератора определяются его выходной характеристикой $U_{\text{вых}} = f(n)$. Для идеального асинхронного тахогенератора выходная характеристика представляет собой прямую линию, выходящую из начала координат (рис. 18.4, б, прямая 1). Однако из-за погрешностей реального тахогенератора его выходная характеристика совпадает с идеальной лишь в начале и с ростом частоты вращения она становится криволинейной (график 2).

Это приводит к амплитудной погрешности тахогенератора

$$\Delta U_A = U_{\text{вых, и}} - U_{\text{вых, р}} \quad (18.2)$$

где $U_{\text{вых, и}}$ и $U_{\text{вых, р}}$ — напряжения на выходе идеального и реального тахогенераторов при заданной частоте вращения.

Основная причина амплитудной погрешности в том, что напряжение $U_{\text{вых}}$ отличается от ЭДС за счет падения напряжения в генераторной обмотке тахогенератора $I_r Z_{\text{нг}}$. С ростом частоты вращения ток в генераторной обмотке тахогенератора увеличивается, что ведет к росту падения напряжения $I_r Z_{\text{нг}}$ и амплитудная погрешность возрастает. Амплитудную погрешность выражают в %:

$$\Delta u_A = \frac{\Delta U_A}{U_{\text{вых, и}}} 100. \quad (18.3)$$

Достоинство асинхронного тахогенератора — отсутствие скользящих контактов, что обеспечивает ему эксплуатационную надежность и стабильность выходной характеристики.

Недостатки — нелинейность выходной характеристики, малая мощность на выходе, повышенные габариты (больше, чем у тахогенераторов посто-

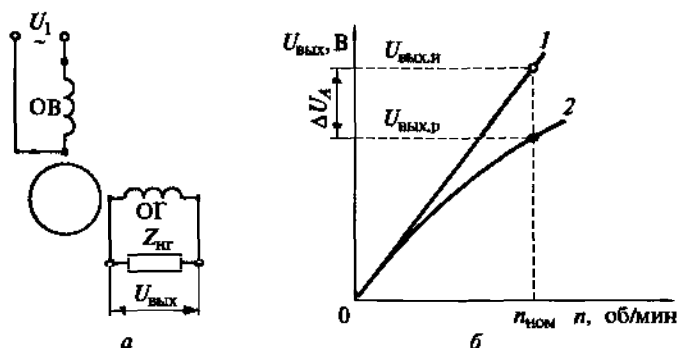


Рис. 18.4. Асинхронный тахогенератор:

а — схема включения; б — выходная характеристика

Таблица 18.2. Технические данные асинхронных тахогенераторов типа ТА40

Типоразмер	f , Гц	U_b , В	C_u , мВ/(об/мин)	$P_{потр}$, Вт	$n_{ном}$, об/мин	$Z_{лг}$, кОм	Класс точности	$D_{корп}$, мм	Масса, кг
ТА40-6-Д46	400	115	6	5	6000	100	0,5	40	0,25
ТА40-6-Д47	400	115	6	5	6000	100	0,1	40	0,25
ТА40-6	400	115	6	5	6000	100	0,25	40	0,25

янного тока в 2—3 раза). Несмотря на перечисленные недостатки, асинхронные тахогенераторы применяют в системах электропривода, что объясняется их повышенной эксплуатационной надежностью. В табл. 18.2 приведены технические данные асинхронных встраиваемых тахогенераторов с полым немагнитным ротором типа ТА40.

Условия эксплуатации указанных тахогенераторов: температура окружающего воздуха от -1 до $+45^\circ\text{C}$; относительная влажность 80 % при температуре 25°C ; режим работы продолжительный S1 или повторно-кратковременный S3. Исполнение по степени защиты IP42; рабочее положение в пространстве любое.

В качестве датчика обратной связи, а также для инвертируемых звеньев вычислительных устройств применяют асинхронный тахогенератор с полым немагнитным ротором 4ТИ-3,2.

Технические данные ротора 4ТИ-3,2:

Частота напряжения, Гц	400
Напряжение возбуждения, В	115
Крутизна выходной характеристики, мВ/(об/мин) ...	3,2
Класс точности	
(по требованию заказчика)	0,05; 0,1
Частота вращения, об/мин	6000
Масса, кг	0,32
Диаметр корпуса, мм	40

18.3. Сельсины

Сельсины — это элементы синхронной связи, обеспечивающие одно-

временный поворот или одновременное вращение нескольких, механически не связанных между собой валов механизмов.

Сельсин конструктивно представляет собой асинхронную машину с фазным ротором. Одна из обмоток расположена на статоре, а другая — на роторе и соединена с внешней цепью через контактные кольца и щетки. Если одна из обмоток однофазная, то сельсин называют *однофазным*.

Рассмотрим работу **индикаторной системы синхронной связи**, состоящей из двух однофазных сельсинов: сельсина-датчика и сельсина-приемника (рис. 18.5). При этом однофазные обмотки включены в сеть переменного тока и являются обмотками возбуждения (ОВ), а трехфазные обмотки, называемые *обмотками синхронизации*, соединены друг с другом линией связи. Переменный ток обмоток возбуждения наводит в сельсинах магнитные потоки возбуждения $\Phi_{вд}$ и $\Phi_{вп}$, которые индуцируют в обмотках синхронизации сельсинов ЭДС: в датчике — $E_{Ад}$, $E_{Вд}$ и $E_{Сд}$, в приемнике — $E_{Ап}$, $E_{Вп}$ и $E_{Сп}$. Величина ЭДС той или иной фазы обмотки синхронизации зависит от ее пространственного расположения относительно обмотки возбуждения. Если фазы обмоток синхронизации датчика и приемника расположены одинаково относительно соответствующих обмоток возбуждения ($\alpha_d = \alpha_p$), то в соединенных линией связи фазных обмотках синхронизации индуди-

руются одинаковые и встречно направленные ЭДС. Эти ЭДС уравнивают друг друга, и в цепи обмоток синхронизации ток отсутствует. Такое положение роторов сельсинов называют *согласованным*.

Если ротор датчика вывести из согласованного положения поворотом на некоторый угол α_d , то равновесие ЭДС, индуцируемых в фазах обмоток синхронизации, нарушится. При этом в обмотках синхронизации и линии связи появятся уравнивающие токи. В результате взаимодействия этих токов с потоком возбуждения сельсина-приемника $\Phi_{вп}$ возникает вращающий (синхронизирующий) момент, который будет поворачивать ротор приемника до тех пор, пока он не придет в согласованное с ротором датчика положение, т.е. пока его ротор не повернется на угол $\alpha_n \approx \alpha_d$. Точной отработке заданного угла α_d ротором сельсина-приемника мешают силы трения в подшипниках и на контактных кольцах. Ошибка в воспроизведении угла

α_d , заданного на датчике, оценивается углом рассогласования

$$\theta = \alpha_d - \alpha_n. \quad (18.4)$$

Таким образом, если ротор сельсина-датчика продолжать поворачивать, то ротор сельсина-приемника будет следовать за ротором датчика, но ошибка рассогласования θ будет сохраняться.

Точность передачи угловых перемещений индикаторной системы зависит от погрешности самих сельсинов, длины линии связи и нагрузки на вал сельсина-приемника. Величина ошибки рассогласования сельсинов-приемников в зависимости от класса точности может составлять от $\pm 1,5$ до $\pm 2,5^\circ$. Возможна работа нескольких сельсинов-приемников от одного сельсина-датчика. При этом точность воспроизведения угла снижается пропорционально количеству сельсинов-приемников, работающих от одного датчика.

С помощью индикаторной системы можно лишь фиксировать угол пово-

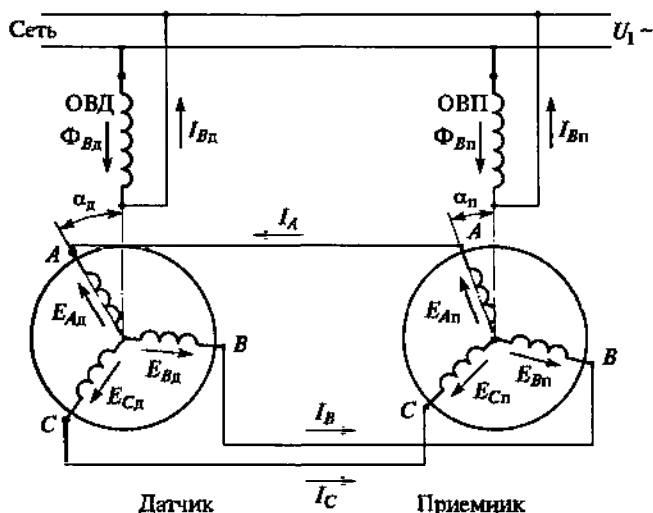


Рис. 18.5. Индикаторная схема синхронной передачи угла поворота на сельсинах

рота, заданный датчиком. Но для отработки этого угла на рабочем органе какого-либо механизма индикаторная система непригодна, так как электромагнитный момент на роторе приемника весьма мал.

Трансформаторная система дистанционной передачи угла используется для передачи угла поворота на рабочий орган механизма, когда необходим значительный вращающий момент. Основные элементы трансформаторной системы (рис. 18.6): сельсин-датчик СД, сельсин-приемник СП, усилитель мощности У, исполнительный двигатель ИМ и редуктор Р, предназначенный для редукции частоты вращения и усиления вращающего момента. Усилитель мощности используют для усиления мощности сигнала на выходе сельсина-приемника до уровня, достаточного для приведения в действие исполнительного двигателя. Трансформаторная система передачи представляет собой следящую систему передачи угла поворота, заданного на сельсине-датчике, с обрат-

ной связью по положению вала регулирующего органа РО рабочего механизма.

При включении в сеть переменного тока обмотки возбуждения сельсина-датчика ОВД пульсирующий магнитный поток возбуждения $\Phi_{\text{в}}$ наводит в фазах обмотки синхронизации сельсина-датчика электродвижущие силы $E_{\text{Ад}}$, $E_{\text{Бд}}$ и $E_{\text{Сд}}$. Величина этих ЭДС зависит от угла поворота ротора датчика $\alpha_{\text{д}}$ относительно поперечной оси. Согласованным положением роторов датчика и приемника в трансформаторной системе считают положение, когда одноименные фазные обмотки синхронизации датчика и приемника смещены относительно друг друга на 90° . Поэтому (см. рис. 18.6) отсчет угла $\alpha_{\text{д}}$ в датчике ведется от оси, перпендикулярной оси обмотки возбуждения ОВД.

В трансформаторной системе токи синхронизации создаются только электродвижущими силами, наведенными в датчике, а не разностью ЭДС, как в индикаторной системе. Токи синхро-

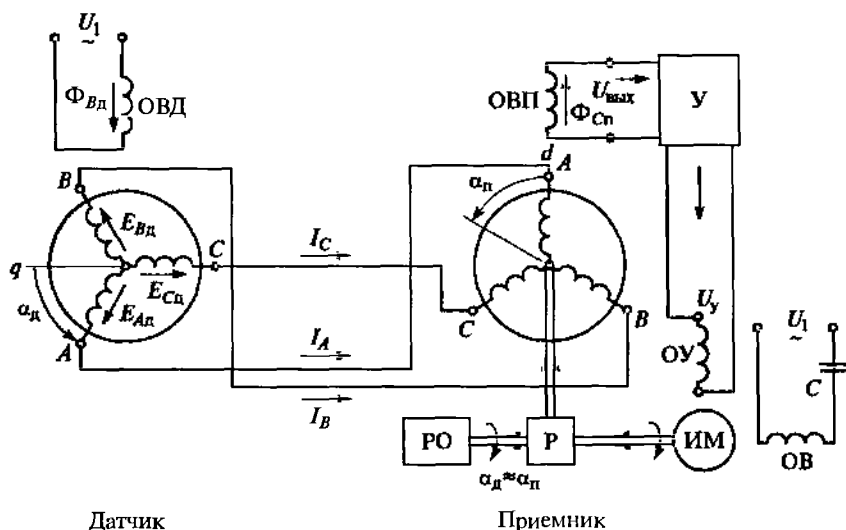


Рис. 18.6. Трансформаторная система синхронной передачи угла на сельсинах

низации, проходя по соответствующим фазным обмоткам синхронизации сельсина-приемника, создают пульсирующие МДС. Результирующая МДС синхронизации по продольной оси создает пульсирующий магнитный поток по продольной оси $\Phi_{\text{СП}}$, который наводит в обмотке возбуждения сельсина-приемника ЭДС

$$E_{\text{вых}} = E_{\text{max}} \sin \alpha_{\text{д}}, \quad (18.5)$$

где E_{max} — наибольшее действующее значение ЭДС, индуцированной в обмотке возбуждения сельсина-приемника, соответствующее углу поворота ротора сельсина-датчика относительно его поперечной оси q (см. рис. 18.6) на угол $\alpha_{\text{д}} = 90^\circ$ и положению ротора сельсина-приемника, при котором ось обмотки фазы синхронизации A этого сельсина расположена по продольной оси d , т.е. по оси обмотки возбуждения ОВП ($\alpha_{\text{н}} = 0$).

Таким образом, обмотка возбуждения сельсина-приемника ОВП в трансформаторной системе выполняет функцию генераторной обмотки и не является обмоткой, возбуждающей в сельсине-приемнике магнитный поток, как это имело место в индикаторной системе передачи угла (см. рис. 18.5). Сигнал напряжения на выходе приемника $U_{\text{вых}} \approx E_{\text{вых}}$ поступает на вход усилителя мощности У, на выходе которого включена обмотка управления ОУ исполнительного двигателя ИМ. При этом ротор двигателя приходит во вращение, которое через редуктор Р, понижающий частоту вращения, передается на вал рабочего органа механизма РО и на ротор сельсина-приемника СП. По мере отработки заданного угла $\alpha_{\text{д}}$ МДС синхронизации по продольной оси сельсина-приемника $F_{\text{СП}}$ постепенно уменьшается, следовательно, уменьшаются магнитный

поток $\Phi_{\text{СП}}$ и напряжение сигнала $U_{\text{вых}}$. После того как ротор приемника повернется на угол $\alpha_{\text{п}} \approx \alpha_{\text{д}}$, выходной сигнал напряжения уменьшится до $U_{\text{вых}} \approx 0$ и трансформаторная система придет в равновесие.

Особенность работы трансформаторной системы состоит в том, что сельсин-приемник этой системы самостоятельно не отрабатывает заданный угол поворота, а только выдает сигнал на включение исполнительного двигателя, который осуществляет отработку заданного угла поворота. Применяв в системе исполнительный двигатель требуемой мощности, можно посредством трансформаторной системы передачи угла управлять угловым положением вала рабочего механизма.

По **конструкции** сельсины разделяют на контактные и бесконтактные. Отличительный признак **контактных сельсинов** — наличие у них контактных колец и щеток, посредством которых обмотка ротора соединяется с внешней цепью. Обычно сельсины делают двухполюсными. Магнитную систему контактного сельсина (сердечники статора и ротора) выполняют из листовой электротехнической стали. Сельсины могут быть *явнополюсными* и *неявнополюсными*. В явнополюсных сельсинах один из элементов магнитопровода (статор или ротор) имеет два явно выраженных полюса с полюсными катушками обмотки возбуждения ОВ. Тогда другой элемент (ротор или статор) делают неявнополюсным с распределенной обмоткой синхронизации ОС, состоящей из трех обмоток фаз, сдвинутых в пространстве относительно друг друга на 120° (рис. 18.7, а, б). Если ротор сельсина-приемника явнополюсный, то на его сердечнике обычно располагают демпферную (успокоительную) обмотку

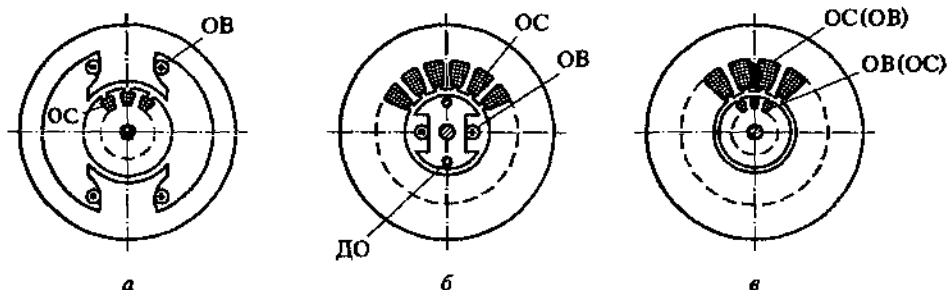


Рис. 18.7. Магнитные системы однофазных контактных сельсинов:

а — с явнополюсным статором; *б* — с явнополюсным ротором; *в* — неявнополюсная система

ДО в виде короткозамкнутого витка, ось которого перпендикулярна оси полюсов. В неявнополюсных сельсинах обмотки статора и ротора делают распределенными. При этом обмотки синхронизации ОС и возбуждения ОВ могут быть расположены как на роторе, так и на статоре (рис. 18.7, *в*).

В индикаторных системах обычно применяют явнополюсные сельсины, так как они имеют повышенное значение удельного синхронизирующего момента.

В трансформаторных системах используют неявнополюсные сельсины, так как их удельный синхронизирующий момент меньше, чем у явнополюсных, но распределение магнитной индукции в воздушном зазоре практически синусоидально, что обеспе-

чивает необходимую точность трансформаторной системы.

Бесконтактные сельсины не имеют контактных колец и щеток, что обеспечивает им более высокую надежность и стабильность характеристик. Однако бесконтактные сельсины по сравнению с контактными имеют большие габариты и более высокую стоимость.

В табл. 18.3 приведены основные параметры некоторых типов сельсинов.

18.4. Вращающиеся трансформаторы

Вращающиеся (поворотные) трансформаторы (ВТ) предназначены для получения переменного напряжения, значение которого зависит от угла поворота ротора. По назначению ВТ относятся к информационным электрическим машинам и применяются в системах автоматического регулирования в качестве элементов (датчиков угла) для измерения рассогласования между двумя вращающимися осями. Вращающийся трансформатор конструктивно представляет собой электрическую машину индукционного типа малой мощности. Наибольшее применение получили двухполюсные ВТ с

Таблица 18.3. Основные параметры сельсинов

Типоразмер	U_b , В	f , Гц	$M_{\max}$, Н·м	Масса, кг	Тип сельсина
СС440	110	50	0,021	0,8	Контактный
СС410	55	50	0,021	0,8	То же
СС501	110	50	0,172	2,8	»
БС405А	110	50	0,023	1,25	Бесконтактный
БС501А	110	50	0,172	4,0	То же

двумя парами одинаковых взаимно перпендикулярных обмоток: обмотки w_1 и w_k (C1—C2 и C3—C4) расположены на статоре; обмотки w_2 и w_3 (P1—P2 и P3—P4) — на роторе (рис. 18.8).

Обмотка возбуждения (C1—C2) включается в сеть переменного тока, компенсационная обмотка C3—C4 замыкается накоротко или на резистор. Обмотки на роторе называют вторичными: синусная P1—P2 и косинусная P3—P4. Электрический контакт с обмотками ротора осуществляется либо с помощью контактных колец и щеток (аналогично контактным сельсинам), либо посредством спиральных пружин. В последнем случае угол поворота ротора ВТ ограничивается максимальным углом закручивания спиральных пружин.

Принцип работы вращающихся трансформаторов основан на взаимной индуктивности между обмотками статора и ротора, которая изменяется в определенной функциональной зависимости от угла поворота ротора. Электродвижущие силы, наводимые пульсирующим магнитным потоком воз-

буждения в обмотках ротора, строго следуют этой зависимости.

Если ВТ используется в качестве измерительного элемента, то поворот ротора осуществляется посредством редукторного механизма высокой точности, который либо встраивается в корпус ВТ, либо монтируется отдельно от ВТ и механически соединяется с его валом. Если ВТ предназначен для работы в режиме поворота ротора в пределах определенного угла, то в качестве обмоток возбуждения и компенсационной используются обмотки статора, а в качестве вторичных — обмотки ротора.

Если ВТ работает в режиме непрерывного вращения ротора, то обычно применяют «обратное» использование обмоток: обмотки ротора используют в качестве обмоток возбуждения и компенсационной, а обмотки статора — в качестве вторичных. Если компенсационная обмотка замыкается накоротко, то при «обратном» использовании обмоток на роторе применяют лишь два контактных кольца, что упрощает конструкцию, повышает надежность и точность ВТ.

В зависимости от графика функциональной зависимости ЭДС вторичной обмотки от угла поворота ротора вращающиеся трансформаторы разделяют на следующие типы:

- синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ) — напряжение U_2 на выходе обмотки w_2 находится в синусной зависимости от угла поворота ротора α , а напряжение U_3 на выходе обмотки w_3 — в косинусной зависимости от угла поворота ротора α ;

- линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ) — выходное напряжение U_2 находится в прямолинейной зависимости от угла α ;

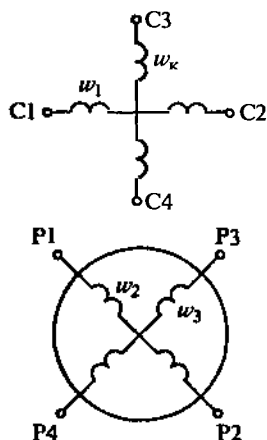


Рис. 18.8. Принципиальная схема вращающегося трансформатора

■ вращающийся трансформатор-построитель (ПВТ) предназначен для решения геометрических задач.

Кроме того, вращающиеся трансформаторы могут применяться в качестве масштабных трансформаторов (МВТ) для согласования напряжений отдельных каскадов автоматического устройства, фазовращателей, электрических машин синхронной связи в трансформаторных системах дистанционной передачи угла.

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор в синусном режиме.

В этом режиме работы используется только синусная обмотка ротора w_2 (рис. 18.9, а). При включении в сеть обмотки возбуждения w_1 в ней появляется ток I_1 , который создает магнитный поток возбуждения Φ_B .

Сцепляясь со вторичной обмоткой w_2 , поток Φ_B наводит в ней ЭДС E_2 , величина которой зависит от угла поворота ротора α . В режиме холостого хода ($I_2 = 0$) напряжение на выходе синусной обмотки

$$U_2 \approx U_{2\max} \sin \alpha, \quad (18.6)$$

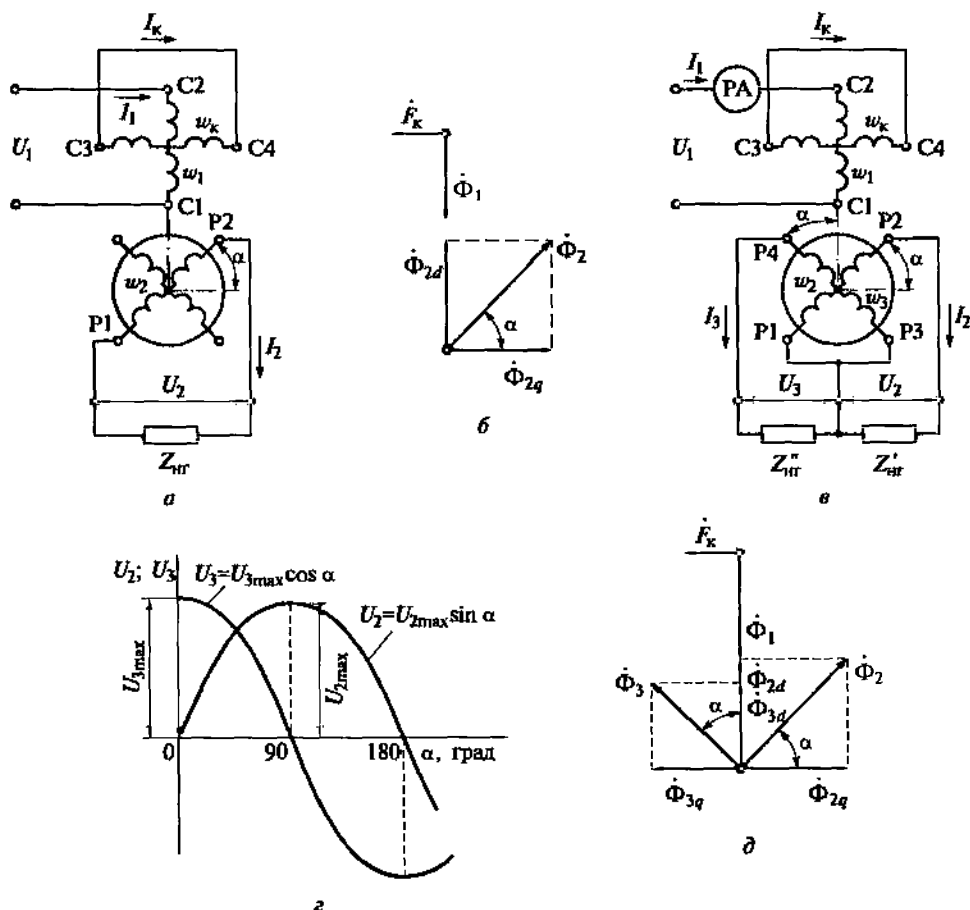


Рис. 18.9. Схемы и диаграммы синусно-косинусного вращающегося трансформатора в синусном (а, б) и синусно-косинусном (в, д) режимах

где $U_{2\max}$ — максимальное действующее значение напряжения на выходе синусной обмотки, соответствующее углу поворота ротора $\alpha = 90^\circ$.

При подключении нагрузки $Z_{\text{н}}$ к зажимам P1 — P2 синусной обмотки в ее цепи появится ток I_2 . Созданный током магнитный поток Φ_2 можно разложить на составляющие: по продольной оси — направленную встречно потоку возбуждения $\dot{\Phi}_{2d} = \dot{\Phi}_2 \sin \alpha$ и по поперечной оси $\dot{\Phi}_{2q} = \dot{\Phi}_2 \cos \alpha$ — вызывающую искажение магнитного потока возбуждения (рис. 18.9, б).

Размагничивающее влияние составляющей потока по продольной оси $\dot{\Phi}_{2d}$ компенсируется увеличением тока в обмотке возбуждения I_1 . Искажение магнитного потока возбуждения, вызванное действием поперечной составляющей потока $\dot{\Phi}_{2q}$, нарушает синусоидальную зависимость напряжения U_2 синусной обмотки w_2 от угла поворота ротора α и вносит погрешность в работу СКВТ, возрастающую с увеличением тока нагрузки I_2 . Устранение этого нежелательного явления осуществляется путем симметрирования вращающегося трансформатора.

В синусном режиме работы СКВТ, когда используется только одна вторичная обмотка, применяется *первичное симметрирование*, основанное на использовании компенсационной обмотки w_k . С этой целью обмотку w_k замыкают на резистор сопротивлением

$$Z_k = Z_i + Z_{\text{пр}}, \quad (18.7)$$

где Z_i и $Z_{\text{пр}}$ — соответственно внутреннее сопротивление источника переменного тока и сопротивление проводов, соединяющих обмотку с этим источником.

Обычно сопротивление проводов $Z_{\text{пр}} \approx 0$, тогда $Z_k = Z_i$. В большинстве случаев обмотку w_1 подключают к ис-

точнику большой мощности, рассчитанному для питания нескольких потребителей постоянного тока. В этом случае внутреннее сопротивление источника $Z_i \approx 0$ и первичное симметрирование СКВТ осуществляется замыканием накоротко обмотки w_k .

Составляющая магнитного потока ротора по поперечной оси $\dot{\Phi}_{2q}$, сцепляясь с компенсационной обмоткой, наводит в ней ЭДС E_k . Так как обмотка замкнута, то ЭДС E_k создает в ней ток I_k , который наводит МДС компенсационной обмотки F_k , направленную в соответствии с правилом Ленца встречно потоку $\dot{\Phi}_{2q}$ (поток $\dot{\Phi}_{2q}$ является причиной возникновения ЭДС E_k и МДС F_k). В результате поток по поперечной оси $\dot{\Phi}_{2q}$ будет в значительной степени ослаблен (скомпенсирован) и погрешность, обусловленная нагрузкой СКВТ, намного снизится.

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор в синусно-косинусном режиме. В этом режиме используются обе вторичные обмотки w_2 и w_3 , смещенные в пространстве относительно друг друга на 90° (рис. 18.9, в). Зависимость напряжения U_2 на выходе обмотки w_2 от угла поворота ротора определяется формулой (18.6), а зависимость напряжения на выходе обмотки w_3 определяется выражением, учитывающим угловой сдвиг этой обмотки относительно обмотки w_2 на 90° :

$$U_3 = U_{3\max} \sin(90 + \alpha), \quad (18.8)$$

где $U_{3\max}$ — максимальное действующее значение напряжения в обмотке w_3 при ее соосном положении с обмоткой возбуждения w_1 .

Из (18.6) и (18.8) следует, что на выходе СКВТ получают два напряжения: одно из них пропорционально $\sin \alpha$, а другое пропорционально $\cos \alpha$ (рис. 18.9, г).

Обмотки w_2 и w_3 имеют одинаковые параметры, поэтому максимальные действующие значения напряжений этих обмоток также одинаковы:

$$U_{2\max} = U_{3\max} = (w_2/w_3)U_1, \quad (18.9)$$

где U_1 — напряжение на входе СКВТ, т.е. на обмотке возбуждения w_1 .

Таким образом, учитывая зависимость (18.9), выражения (18.6) и (18.8) можно записать в виде

$$\begin{aligned} U_2 &= (w_2/w_3)U_1 \sin \alpha; \\ U_3 &= (w_2/w_3)U_1 \cos \alpha. \end{aligned} \quad (18.10)$$

Синусную w_2 и косинусную w_3 обмотки делают одинаковыми по числу витков и диаметру обмоточного провода, поэтому эти обмотки имеют одинаковые параметры.

При неравенстве сопротивлений нагрузок $Z'_{\text{нг}}$ и $Z''_{\text{нг}}$ на зажимах синусной и косинусной обмоток токи I_2 и I_3 создадут не равные магнитные потоки $\dot{\Phi}_2$, $\dot{\Phi}_3$ (см. рис. 18.9, д). Поперечные составляющие этих потоков $\dot{\Phi}_{2q} = \dot{\Phi}_2 \cos \alpha$ и $\dot{\Phi}_{3q} = \dot{\Phi}_3 \sin \alpha$ направлены в противоположные стороны и частично взаимно компенсируются. Полная взаимная компенсация будет только при равенстве МДС синусной и косинусной обмоток по поперечной оси, т.е. при равенстве нагрузок $Z'_{\text{нг}}$ и $Z''_{\text{нг}}$. Такая компенсация называется *вторичным симметрированием*. Если же указанные сопротивления нагрузок не равны, то вторичное симметрирование получается неполным. Результирующий магнитный поток ВТ по поперечной оси $\dot{\Phi}_q = \dot{\Phi}_{2q} - \dot{\Phi}_{3q}$ наводит в синусной обмотке ВТ электродвижущую силу, пропорциональную $\cos^2 \alpha$, а в косинусной обмотке — электродвижущую силу, пропорциональную $\sin^2 \alpha$. Это явление вносит дополнительную погрешность в работу ВТ. Полное вто-

ричное симметрирование достигается *методом амперметра*, при котором в цепь обмотки возбуждения w_1 включают амперметр РА (см. рис. 18.9, д) и сопротивления нагрузок $Z'_{\text{нг}}$ и $Z''_{\text{нг}}$ подбирают такими, чтобы при повороте ротора в любую сторону показания амперметра РА оставались неизменными.

Более точный метод вторичного симметрирования — *метод вольтметра*. Так как при полном вторичном симметрировании поперечные составляющие потоков синусной и косинусной обмоток взаимно уравниваются, то в компенсационной обмотке они не наводят ЭДС. Следовательно, сопротивления нагрузок $Z'_{\text{нг}}$ и $Z''_{\text{нг}}$ подбираются такими, чтобы показания вольтметра, включенного на выводы разомкнутой компенсационной обмотки СЗ—С4, было нулевым в любом положении ротора.

Точность вращающегося трансформатора в режиме СКВТ определяется следующими показателями:

- погрешностью воспроизведения синусной (косинусной) зависимости;
- асимметрией нулевых точек;
- электродвижущей силой компенсационной обмотки;
- остаточной ЭДС;
- разностью коэффициентов трансформации между обмоткой возбуждения и вторичными обмотками.

Погрешность воспроизведения синусной (косинусной) зависимости, %:

$$\varepsilon_{\text{СКВТ}} = \frac{\Delta U}{\Delta U_{\max}} 100, \quad (18.11)$$

где ΔU — наибольшее *среднее* отклонение напряжения на выходе СКВТ от расчетного синусоидального (косинусоидального) закона зависимости выходного напряжения за полные обороты ротора по часовой стрелке ΔU_1 и против часовой стрелки ΔU_2 :

$$\Delta U = 0,5(\Delta U_1 + \Delta U_2), \quad (18.12)$$

$U_{\max}$ — наибольшее действующее значение напряжения на выводах роторных обмоток.

Асимметрия нулевых точек определяется при питании СКВТ со стороны каждой из первичных обмоток по формуле

$$\Delta \alpha_0 = 0,5(\Delta \alpha_1 + \Delta \alpha_2), \quad (18.13)$$

где $\Delta \alpha_1$ и $\Delta \alpha_2$ — максимальные положительное и отрицательное отклонения ротора СКВТ от углов, кратных 90° , соответствующих минимальным значениям ЭДС вторичных обмоток E_2 и E_3 .

Электродвижущая сила компенсационной обмотки определяется в % от номинального напряжения возбуждения U_1 :

$$e_k = \frac{E_k}{U_1} 100, \quad (18.14)$$

где E_k — ЭДС компенсационной обмотки, измеренная на выводах СЗ—С4 при номинальном напряжении U_1 на обмотке возбуждения.

Остаточная ЭДС в нулевых точках определяется в % от максимально действующего значения выходного напряжения $U_{\max}$:

$$e_{\text{ост}} = \frac{E_{\text{ост}}}{U_{\max}} 100, \quad (18.15)$$

где $E_{\text{ост}}$ — остаточная (минимальная) ЭДС, измеренная на выводах вторичной обмотки при положениях ротора в нулевых точках, в которых ЭДС (теоретически) должна быть равна нулю.

Разность коэффициентов трансформации определяет отклонение в параметрах синусной и косинусной обмоток СКВТ, %:

$$\Delta k = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_{\max}} 100, \quad (18.16)$$

где $k_{\max}$ и $k_{\min}$ — коэффициенты трансформации между обмотками.

Существует шесть классов точности СКВТ, которые характеризуются допустимыми показателями, приведенными в табл. 18.4.

В приборных устройствах наряду с рассмотренными двухполюсными ВТ применяют многополюсные вращающиеся трансформаторы. Их обычно используют в устройствах точного отсчета, а также в схемах с малым углом поворота. Такие ВТ выполняют плоскими с относительно большим диаметром (рис. 18.10), что позволяет применить в них обмотки с большим числом полюсов. Благодаря небольшим габаритам и специальной конструкции эти ВТ встраивают непосредственно в измерительное устройство. При этом статор 1 и ротор 2 многополюсных ВТ закрепляют на частях прибора, отно-

Таблица 18.4. Классы точности СКВТ и соответствующие им значения погрешностей

Вид погрешности	Значение погрешностей при классе точности СКВТ					
	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2
$\varepsilon_{\text{СКВТ}}$, %	+0,005	+0,01	$\pm 0,02$	+0,05	+0,1	$\pm 0,2$
$\Delta \alpha_0$, с	± 10	+20	+40	+100	+200	± 400
e_k , %, не более	0,04	0,08	0,12	0,3	0,6	1,2
$e_{\text{ост}}$, %, не более	0,003	0,006	0,01	0,025	0,05	0,10
Δk , %, не более	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2

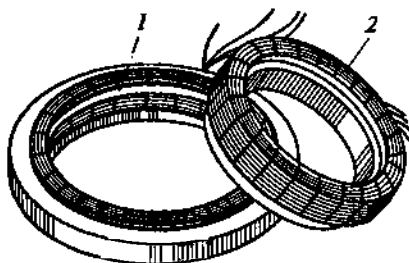


Рис. 18.10. Статор и ротор многополюсного встраиваемого вращающегося трансформатора

сительное угловое перемещение которых они должны регистрировать.

Линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ). Зависимость выходного напряжения U_2 линейного вращающегося трансформатора от угла поворота ротора имеет вид

$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} \frac{U_1 \sin \alpha}{1 + m \cos \alpha}, \quad (18.17)$$

где m — постоянная величина, определяемая магнитными и электрическими параметрами ЛВТ.

Если $m \approx 0,54$, то зависимость $U_2 = f(\alpha)$ линейна с погрешностью не бо-

лее 1 % в пределах изменения угла поворота ротора от 0 до $\pm 60^\circ$ (рис. 18.11, а). Для получения указанной зависимости применяют схему включения обмоток ЛВТ, показанную на рис. 18.11, б. Сопротивление нагрузки в цепи косинусной обмотки Z_c выбирают такой, чтобы обеспечить полное вторичное симметрирование ЛВТ при заданном сопротивлении $Z_{нг}$. Для определения сопротивления Z_c используют выражение:

$$Z_c \approx 2(Z_2 + Z_k + Z_{нг}) - Z_3. \quad (18.18)$$

Однако полное вторичное симметрирование обмоток ЛВТ возможно лишь при неизменной нагрузке $Z_{нг} = \text{const}$. В случае переменной нагрузки применяют схему первичного симметрирования (рис. 18.11, в), в которой обмотка возбуждения включена последовательно с косинусной обмоткой и сопротивлением Z_c , а компенсационная обмотка замкнута на сопротивление Z_k . Сопротивления Z_c и Z_k выбирают такими, чтобы магнитные потоки компенсационной обмотки Φ_k и косинусной обмотки по поперечной оси Φ_{3q} были взаимно скомпенсиро-

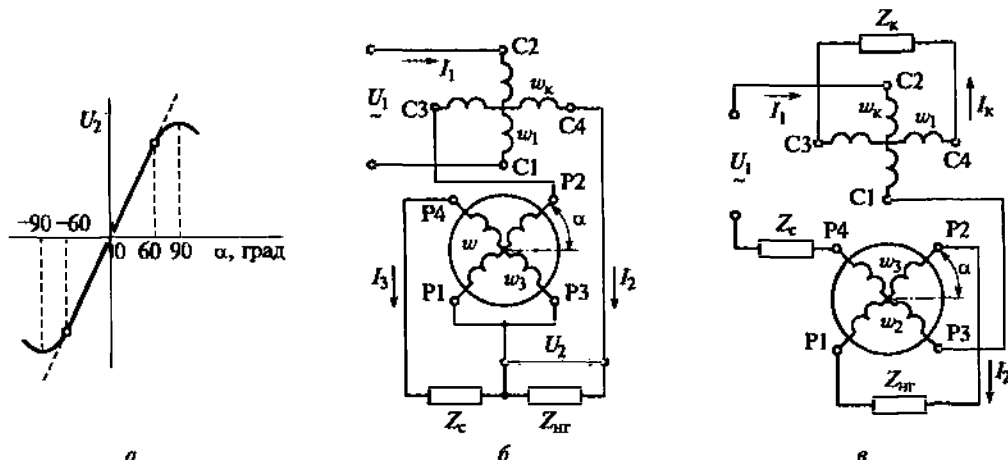


Рис. 18.11. Линейный вращающийся трансформатор:

а — зависимость $U_2 = f(\alpha)$; б — схема ЛВТ со вторичным симметрированием; в — схема ЛВТ с первичным симметрированием

ваны при любом значении угла поворота ротора α .

Точность ЛВТ определяется погрешностью воспроизведения линейной зависимости выходного напряжения от угла поворота ротора в диапазоне $\pm 60^\circ$. Погрешность воспроизведения линейной функции, %:

$$e_{\text{л}} = \frac{\Delta U}{U_{\text{max}}} 100, \quad (18.19)$$

где среднее значение максимальных положительных ΔU_1 и отрицательных ΔU_2 отклонений выходного напряжения от расчетного при повороте ротора ЛВТ на 60° по часовой стрелке и против часовой стрелки равно

$$\Delta U = 0,5(\Delta U_1 + \Delta U_2).$$

Линейные вращающиеся трансформаторы делятся на три класса точности и характеризуются допустимыми показателями, приведенными ниже.

Класс точности ЛВТ	$e_{\text{л}}, \%$	$e_{\text{ост}}, \%$
0,05	$\pm 0,05$	0,025
0,1	$\pm 0,1$	0,05
0,2	$\pm 0,2$	0,1

Вращающиеся трансформаторы, аналогично сельсинам, можно ис-

пользовать в *трансформаторной системе дистанционной передачи угла*. На рис. 18.12 показана принципиальная схема такой передачи. В качестве датчика Д и приемника П применены вращающиеся трансформаторы СКВТ. При подаче напряжения U_1 на обмотку возбуждения $w_{1\text{д}}$ в ВТ-датчике возникает пульсирующий магнитный поток Φ_1 . Положение обмоток ротора ВТ-датчика зависит от угла $\alpha_{\text{д}}$ — поворота ротора относительно оси обмотки $w_{1\text{д}}$. Магнитный поток Φ_1 , сцепляясь с обмотками ротора w_2 и w_3 ВТ-датчика, индуцирует в них ЭДС E_2 и E_3 , под действием которых в цепи синхронизации системы возникают токи. Проходя по обмоткам ротора w_2 и w_3 ВТ-приемника, эти токи создают пульсирующий магнитный поток $\Phi_{\text{п}}$. Пространственное положение вектора этого потока определяется углом поворота ротора ВТ-датчика, т.е. при повороте ротора ВТ-датчика на угол $\alpha_{\text{д}}$ вектор потока $\Phi_{\text{п}}$ поворачивается на такой же угол. Сцепляясь с обмоткой статора $w_{\text{к.п}}$, поток $\Phi_{\text{п}}$ индуцирует в ней ЭДС $E_{\text{вых}}$, величина которой зависит от угла рассогласования системы $\theta = \alpha_{\text{д}} - \alpha_{\text{п}}$. В остальном работа вращающихся трансформаторов в рассматриваемой

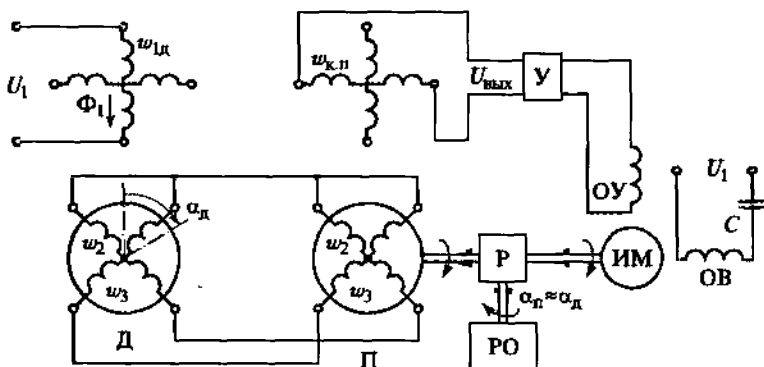


Рис. 18.12. Трансформаторная система дистанционной передачи угла на вращающихся трансформаторах

Таблица 18.5. Технические данные вращающихся трансформаторов

Типоразмер	Напряжение возбуждения, В	Частота тока возбуждения, Гц	Коэффициент трансформации	Частота вращения, об/мин
4МВТ-1	30	400	0,6	—
5МВТ-2-10Э-01	30	400	1,0	60
10МВТ-2В-5П	28	400	0,56	60
10МВТ-2В-10П	28	400	1,0	60
5МВТ-2-5Э-0,1	30	400	0,56	60
ВТ-60	12	2000	0,16	5000
ВТМ-4А	60	400	1,0	2000
ВТМ-5А	5,4	400	1,0	3000
ВТМ-6М	60	2000	1,0	3000

системе аналогична работе сельсинов (см. 18.3).

Важнейший показатель работы системы дистанционной передачи угла — *точность отработки угла*, заданного на датчике. Точность системы будет тем выше, чем меньше погрешность примененных в ней вращающихся трансформаторов. Показателем точности системы дистанционной передачи угла является *погрешность следования*, представляющая собой разность угловых положений системы. В зависимости от погрешности следования трансформаторные системы с вращающимися трансформаторами делят на 11 классов точности в диапазоне от +0,1 до +30 мин.

В отличие от трансформаторной системы на сельсинах система на ВТ обеспечивает более высокую точность, что объясняется большей точностью вращающихся трансформаторов по сравнению с сельсинами. Однако мощность на выходе ВТ-приемника меньше мощности на выходе сельсина-приемника, поэтому для трансформаторных систем на ВТ требуются усилители мощности с более высоким коэффициентом усиления.

Промышленность изготавливает вращающиеся трансформаторы, предназначенные для включения в сеть переменного тока обычно частотой 400 и 2000 Гц.

Условия эксплуатации: температура окружающей среды от -60 до $+100$ °С; относительная влажность воздуха 98 % при 40 °С; вибрационные нагрузки с частотой 1000 Гц и ускорением 75 м/с².

В табл. 18.5 приведены технические данные вращающихся трансформаторов некоторых типоразмеров, а на рис. 18.13 показаны габаритные и установочно-присоединительные размеры вращающихся трансформаторов серии МВТ.

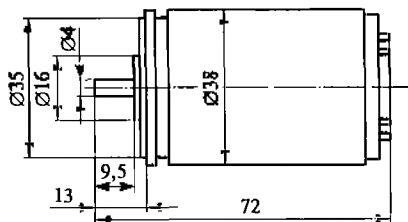


Рис. 18.13. Габаритные и установочно-присоединительные размеры вращающегося трансформатора серии МВТ

ГЛАВА 19

ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

19.1. Принцип действия
электромашинного усилителя

Электромашинный усилитель (ЭМУ) представляет собой электрическую машину, работающую в генераторном режиме и предназначенную для усиления электрических сигналов. Простейший ЭМУ — это генератор постоянного тока независимого возбуждения. Так как напряжение на выходе генератора зависит от тока возбуждения, то, изменяя ток возбуждения, можно управлять напряжением на выходе генератора. Следовательно, сравнительно небольшой мощностью в цепи обмотки возбуждения можно управлять значительной мощностью в цепи якоря.

Электромашинные усилители, выполненные по принципу генератора независимого возбуждения, не могут обеспечить требуемого большого коэффициента усиления по мощности (не более 80—100), представляющего собой отношение мощности на выходе усилителя к мощности на входе обмотки управления.

Наибольшее распространение в автоматике получили *электромашинные усилители поперечного поля*. В отличие от обычного генератора постоянного тока в этом ЭМУ основным рабочим потоком является магнитный поток, создаваемый током обмотки якоря, — поперечный поток реакции якоря.

На коллекторе ЭМУ установлено два комплекта щеток: один комплект — $q_1—q_2$ (рис. 19.1, а) — расположен по поперечной оси главных полюсов, т.е. на геометрической нейтрали, а другой — $d_1—d_2$ — по продольной оси

главных полюсов. Щетки $q_1—q_2$ замкнуты накоротко, а к щеткам $d_1—d_2$ подключена рабочая цепь ЭМУ.

Помимо обмотки якоря усилитель имеет одну или несколько обмоток управления (y_1, y_2), компенсационную обмотку (ОК), поперечную подмагничивающую обмотку (ОП) и обмотку добавочных полюсов (ОД). Якорь усилителя приводится во вращение электродвигателем. Если к одной из обмоток управления подвести напряжение U_y , то в этой обмотке появится ток управления I_y , который создаст МДС обмотки управления $F_y = I_y w_y$. Эта МДС, в свою очередь, создаст магнитный поток Φ_y , который наведет в обмотке якоря в цепи щеток $q_1—q_2$ ЭДС E_q . Электродвижущая сила E_q невелика, но так как щетки $q_1—q_2$ замкнуты накоротко, то E_q вызовет значительный ток I_q . Ток в обмотке якоря I_q создаст МДС F_q и магнитный поток Φ_q , который направлен по поперечной оси главных полюсов, т.е. по геометрической нейтрали, и неподвижен в пространстве. В обмотке якоря, вращающейся в неподвижном потоке Φ_q , наводится ЭДС E_d , снимаемая с продольных щеток $d_1—d_2$.

Если к выходным зажимам ЭМУ подключить нагрузку $r_{н\Gamma}$, то E_d создаст в цепи щеток $d_1—d_2$ рабочий ток I_d .

Таким образом, небольшая мощность обмотки управления проходит две ступени усиления: сначала эта мощность усиливается на ступени «цепь управления — поперечная цепь», а затем на ступени «поперечная цепь — продольная (рабочая) цепь».

Усиление мощности на каждой ступени характеризуется *коэффициентом*

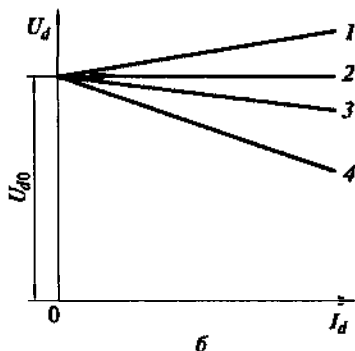
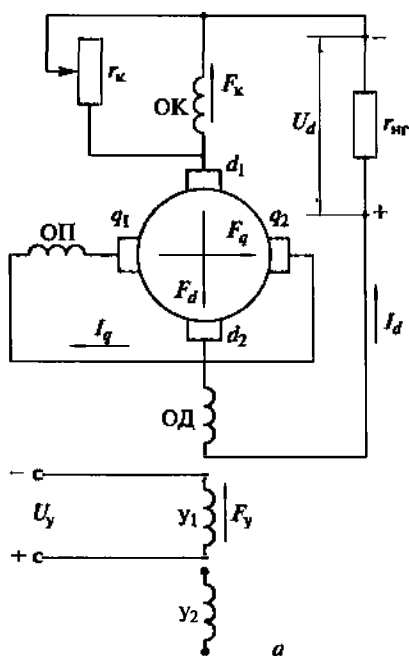


Рис. 19.1. Электромашиный усилитель поперечного поля:

a — принципиальная схема; *б* — внешние характеристики

усиления, который на ступени «цепь управления — поперечная цепь» определяется отношением мощности в поперечной цепи $P_q = E_q I_q$ к мощности управления $P_y = U_y I_y$:

$$k_{y1} = \frac{P_q}{P_y}.$$

Коэффициент усиления на ступени «поперечная цепь — продольная (рабочая) цепь» определяется отношением мощностей в этих цепях:

$$k_{y2} = \frac{P_d}{P_q},$$

где $P_d = U_d I_d$ — мощность в рабочей цепи усилителя, т.е. в цепи щеток $d_1 - d_2$.

Общий коэффициент усиления ЭМУ равен произведению частных коэффициентов усиления:

$$k_y = k_{y1} k_{y2} = \frac{P_q}{P_y} \frac{P_d}{P_q} = \frac{P_d}{P_y}.$$

Коэффициент усиления электромашиных усилителей может достигать 10 000.

Следует помнить, что мощность на выходе ЭМУ P_d представляет собой преобразованную механическую мощность приводного электродвигателя. Значение этой мощности, которое может достигать более 10 кВт, управляется небольшой мощностью в цепи обмоток управления.

Обмотка добавочных полюсов (ОД) служит для улучшения коммутации на продольных щетках $d_1 - d_2$. Поперечная подмагничивающая обмотка (ОП) усиливает магнитный поток по поперечной оси, что позволяет уменьшить ток в цепи щеток $q_1 - q_2$, следовательно, улучшить коммутацию на этих щетках (в ЭМУ малой мощности эта обмотка отсутствует).

Компенсационная обмотка (ОК), наличие которой в ЭМУ обязательно, устраняет размагничивающее влияние

реакции якоря по продольной оси. Дело в том, что ток рабочей цепи ЭМУ (ток нагрузки) I_d создает МДС по продольной оси F_d , направленную навстречу МДС обмотки управления F_y . Эта МДС намного меньше МДС F_d , поэтому даже при небольшой нагрузке усилителя размагничивающее влияние реакции якоря по продольной оси настолько велико, что усилитель размагничивается, и напряжение на его выводах падает до нуля. Для устранения этого явления на статоре ЭМУ располагают компенсационную обмотку, включенную последовательно в рабочую цепь якоря. С появлением тока I_d в рабочей цепи возникает МДС компенсационной обмотки F_k , которая направлена по продольной оси встречно МДС реакции якоря F_d . Этим устраняется (компенсируется) размагничивающее влияние реакции якоря по продольной оси.

Для полной компенсации необходимо, чтобы МДС F_d и F_k были равны, так как недокомпенсация ($F_k < F_d$) или перекомпенсация ($F_k > F_d$) оказывает значительное влияние на магнитный поток Φ_y , а следовательно, и на свойства ЭМУ. Однако рассчитать компенсационную обмотку с достаточной точностью практически невозможно, что ведет к необходимости опытной настройки требуемого значения МДС F_k посредством реостата r_k , шунтирующего компенсационную обмотку.

Электромашинные усилители поперечного поля делают двухполюсными, при этом каждый из главных полюсов расщепляют на две части 1, между которыми располагают добавочные полюса 2 (рис. 19.2). Обмотки управления 4 выполняют сосредоточенными в виде полюсных катушек, надетых на главные полюса, что же ка-

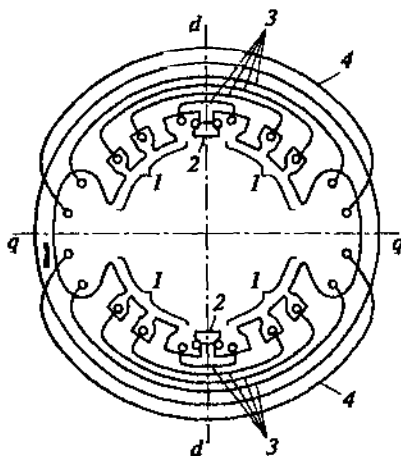


Рис. 19.2. Расположение обмоток на статоре ЭМУ

сается компенсационной обмотки 3, то ее делают распределенной, используя для этого пазы в полюсных наконечниках главных полюсов. Этим достигается компенсация продольной реакции якоря по всему периметру статора.

При мощности до нескольких киловатт ЭМУ устанавливают в одном корпусе с приводным двигателем постоянного или переменного тока. При значительной мощности ЭМУ и двигатель выполняют отдельно и монтируют на общей раме, а их валы соединяют механической муфтой.

Рабочие свойства ЭМУ в значительной степени определяются его внешней характеристикой $U_d = f(I_d)$ при $n = \text{const}$ и $I_y = \text{const}$. Напряжение на выходе усилителя

$$U_d = E_d - I_d \sum r_d,$$

где $\sum r_d$ — сумма электрических сопротивлений в продольной цепи якоря, Ом, включающая в себя сопротивления обмоток якоря r_a , добавочных полюсов r_d , компенсационной обмотки r_k и щеточного контакта $r_{щ}$.

Ввиду того что магнитная цепь усилителя не насыщена, напряжение U_d является линейной функцией тока нагрузки I_d , т.е. внешняя характеристика ЭМУ представляет собой практически прямую линию (см. рис. 19.1, б).

Угол наклона внешней характеристики к оси абсцисс (жесткость характеристики) зависит от степени компенсации реакции якоря. При полной компенсации МДС компенсационной обмотки F_k равна МДС реакции якоря по продольной оси F_d . В этом случае внешняя характеристика получается достаточно жесткой (график 3), так как уменьшение напряжения U_d при увеличении тока нагрузки I_d происходит лишь за счет увеличения падения напряжения в цепи якоря по продольной оси.

При недокомпенсации $F_k < F_d$ внешняя характеристика получается менее жесткой (график 4). Объясняется это тем, что при недокомпенсации МДС F_d , возрастая с увеличением тока I_d , значительно ослабляет магнитный поток обмотки управления Φ_y , что ведет к заметному уменьшению напряжения на выходе ЭМУ.

Если в усилителе настроить небольшую перекомпенсацию ($F_k > F_d$) так, чтобы МДС F_k полностью скомпенсировала не только МДС реакции якоря F_d по продольной оси, но и падение напряжения в цепи продольных щеток $I_d \sum r_d$, то внешняя характеристика усилителя становится абсолютно жесткой и располагается параллельно оси абсцисс (график 2). В этом случае напряжение на выходе ЭМУ остается неизменным во всем диапазоне изменения нагрузки.

При значительной перекомпенсации внешняя характеристика (график 1) приобретает вос-

ходящий характер, так как МДС F_k не только компенсирует F_d , но и создает дополнительный продольный поток, который, накладываясь на магнитный поток управления Φ_y , вызывает увеличение ЭДС E_d . Работа усилителя с перекомпенсацией становится неустойчивой, так как возникает опасность произвольного самовозбуждения ЭМУ, при котором увеличение напряжения на выходе усилителя вызывает рост тока нагрузки, что ведет к дальнейшему увеличению напряжения, т.е. происходит неограниченное увеличение тока нагрузки.

Обычно в усилителе настраивают небольшую недокомпенсацию, при которой увеличение напряжения U_d при уменьшении тока I_d от номинального значения до нуля составляло бы 12—20 %.

Важным параметром электромашинных усилителей является быстродействие, которое определяется величиной электромагнитной постоянной времени, т.е. скоростью протекания электромагнитных процессов. Электромагнитная постоянная времени, с:

$$T_y \approx \frac{L_y}{R_y},$$

где L_y — индуктивность обмотки управления, Гн; R_y — активное сопротивление данной обмотки, Ом.

Для повышения быстродействия усилителя последовательно в цепь обмотки управления иногда включают добавочный резистор $R_{доб}$, что способствует снижению величины T_y . Однако следует помнить, что при включении $R_{доб}$ увеличивается мощность управления

$$P_y = I_y^2 (R_y + R_{доб}),$$

что ведет к снижению коэффициента усиления ЭМУ.

19.2. Электромашинные усилители серии ЭМУ

Промышленность изготавливает электромашинные усилители серии ЭМУ, предназначенные для электропитания обмоток управления исполнительных двигателей в системах автоматического регулирования.

Усилитель мощности серии ЭМУ представляет собой агрегат, состоящий из генератора постоянного тока с поперечным полем (см. рис. 19.1) и приводного двигателя с общим валом и объединенных в едином корпусе (рис. 19.3). Чаще всего в качестве приводного двигателя используют трех-

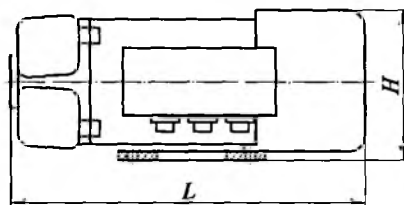


Рис. 19.3. Габаритные размеры электромашинных усилителей мощности серии ЭМУ

фазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, реже — двигатель постоянного тока параллельного возбуждения.

Исполнение усилителей закрытое IP55, охлаждение — наружный обдув. Вентилятор отлит из алюминиевого

Таблица 19.1. Технические данные усилителей мощности серии ЭМУ

Типоразмер	Генератор					Двигатель			
	Мощность часовая/длительная, кВт	U_d , В	Сопротивление обмотки управления, кОм			Тип	U_1 , В	f_1 , Гц	$P_{ном}$, кВт
			R_{y1}	R_{y2}	R_{y3}				
ЭМУ12А	1,0/0,8	115	1,77	1,77	—	АД	380/220	50	1,3
ЭМУ13А	0,35/0,24	115	1,77	1,77	—	АД	380/220	50	0,43
ЭМУ22А	2,0/0,96	115	1,6	1,6	—	АД	380/220	50	1,61
ЭМУ25А	2,0/1,6	230	1,6	1,6	—	АД	380/220	50	2,35
ЭМУ31А	4,0/2,1	115	1,7	1,9	1,7	АД	380/220	50	3,0
ЭМУ32П	—/2,4	115	1,5	1,6	1,5	ДПТ	110	—	4,0
ЭМУ50А	4,0/2,8	230	0,023	0,025	0,023	АД	380/220	50	4,1
ЭМУ70А	6,0/4,2	230	1,55	1,8	1,55	АД	380/220	50	6,0
ЭМУ100А	8,5/5,1	230	1,7	2,0	1,7	АД	380/220	50	8,2

Таблица 19.2. Габаритные размеры усилителей серии ЭМУ (рис. 19.3)

Типоразмер	Длина L , мм	Высота H , мм	Типоразмер	Длина L , мм	Высота H , мм
ЭМУ12А	605	225	ЭМУ32П	580	265
ЭМУ13А	430	160	ЭМУ50А	825	360
ЭМУ22А	530	245	ЭМУ70А	855	445
ЭМУ25А	690	360	ЭМУ100А	965	455
ЭМУ31А	566	265			

сплава, насажен на конец вала со стороны двигателя.

Существуют модификации усилителей защищенного исполнения, в которых генератор и двигатель имеют отдельные валы, соединенные посредством муфты.

Условия эксплуатации: температура окружающего воздуха от -50 до $+50$ °С; высота над уровнем моря 1000 м; от-

носительная влажность воздуха до 98 % при температуре 20 °С; вибрационные нагрузки частотой 10—12 Гц при амплитуде вибрационных смещений 1 мм.

Основные параметры некоторых типоразмеров усилителей серии ЭМУ приведены в табл. 19.1, габаритные размеры указаны на рис. 19.3 и в табл. 19.2.

РАЗДЕЛ VI

ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

ГЛАВА 20

ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

20.1. Выбор двигателей по роду тока и принципу действия, конструктивному исполнению и внешним воздействиям

Род тока для электропитания двигателя (постоянный ток, переменный ток трех- или однофазный промышленной или повышенной частоты) определяется выбором типа двигателя: двигатель постоянного или переменного тока (синхронный либо асинхронный). Выбранный двигатель должен в наибольшей степени удовлетворять требованиям, предъявляемым к электроприводу, и одновременно быть максимально экономичным и надежным.

«Правила устройства электроустановок» [14] регламентируют основные положения выбора двигателей для электроприводов.

1. Электрические и механические параметры двигателей (номинальные значения мощности, напряжения, частоты вращения, относительная продолжительность включения, перегрузочная способность, начальный пусковой момент, диапазон регулирования частоты вращения и т.п.) долж-

ны соответствовать параметрам приводимых в действие механизмов.

2. Для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения, независимо от мощности следует применять двигатели синхронные или асинхронные с короткозамкнутым ротором.

3. Для привода механизмов с тяжелыми условиями пуска или работы либо требующих изменения частоты вращения следует применять двигатели с наиболее простыми и экономичными методами пуска и регулирования частоты вращения, возможными в данной электроустановке.

4. Двигатели постоянного тока допускается применять только в случаях, когда двигатели переменного тока не обеспечивают требуемых характеристик механизма либо неэкономичны.

5. Двигатели, устанавливаемые на открытом воздухе, должны иметь исполнение по степени защиты не менее IP44 или специальное исполнение, соответствующее условиям работы конкретного электропривода (например, для химических установок, взрыво- или пожароопасных сред эксплуатации для особо низких температур окружающей среды и т.п.).

6. Двигатели, устанавливаемые в помещениях, где возможно оседание на обмотках пыли, волокон или других веществ, нарушающих охлаждение, должны иметь закрытое исполнение по степени защиты не менее IP44 или защищенное исполнение, при условии продувания внутренней полости двигателя чистым воздухом, поступающим извне по воздуховодам. При этом корпус продуваемого двигателя, воздухопроводы, все сопряжения и стыки должны иметь уплотнение, исключающее присос воздуха из помещения, где установлен собственно двигатель.

7. При установке двигателей в помещениях с температурой окружающей среды более 40°C должны быть выполнены мероприятия, исключающие возможность недопустимого перегрева двигателя. Например, применить двигатели, рассчитанные на температуру внешней среды, превышающую 40°C (двигатели металлургических серий), или же применить принудительную вентиляцию с подводом охлажденного воздуха и т.п.

8. Двигатели, устанавливаемые в сырых и особо сырых местах, должны иметь закрытое исполнение и влагостойкую изоляцию обмоток.

9. Вибрационные и ударные воздействия на двигатель не должны превышать значений, допустимых для данного двигателя.

10. Двигатели, устанавливаемые во взрывоопасных или пожароопасных зонах, должны выбираться в соответствии с рекомендациями, изложенными в 7.4.

Для электропривода с глубоким регулированием частоты вращения приходится делать выбор между двигателем постоянного тока и асинхронным двигателем с короткозамкнутым

ротором при его питании от регулируемого преобразователя частоты, т.е. с использованием частотного регулирования. Применение преобразователей частоты в современном электроприводе хотя и является прогрессивным, но в ряде случаев сдерживается их повышенной стоимостью. При решении вопроса об использовании преобразователя частоты не следует забывать о его энергосберегающем эффекте, снижающем эксплуатационные расходы электропривода, и о возможности «мягкого» пуска двигателя, что повышает надежность электропривода (см. 21.6).

Окончательное решение о применении в электроприводе двигателя постоянного тока или асинхронного двигателя в комплекте с преобразователем частоты должно основываться на экономических расчетах рассматриваемых вариантов с учетом не только капитальных затрат, но и расходов, связанных с эксплуатацией электропривода.

Исходя из характера работы электропривода, требуемых механических характеристик, номинальной частоты вращения и диапазона ее регулирования, определяют тип двигателя: асинхронный, синхронный, коллекторный или вентильный постоянного тока.

В электроприводе большой мощности (более 400 кВт) оправдано применение трехфазных синхронных двигателей, имеющих наиболее высокие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности).

Основные *недостатки* двигателей постоянного тока: необходимость в преобразователе переменного тока в постоянный, повышенная стоимость, необходимость в уходе за щеточно-коллекторным узлом (периодическая чистка коллектора и щеток, замена

щето, регулировка их прижатия к коллектору и т.д.), недопустимость применения во взрыво- и пожароопасных помещениях, повышенная стоимость. Двигатели постоянного тока в 2—3 раза дороже асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Для электроприводов подъемных устройств с тяжелыми условиями пуска, реверсом и перегрузками возможно применение двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением.

Параметры питающей сети определяют выбор номинального напряжения и предельную токовую нагрузку, которая не вызвала бы в этой сети падения напряжения, превышающего допустимые значения.

Способ монтажа и условия эксплуатации определяют форму конструктивного исполнения двигателя: степень защиты, способ охлаждения и способ монтажа (двигатель на лапах или фланцевого крепления, закрытого или защищенного исполнения) и его климатическое исполнение (для умеренного, холодного, тропического климата и т.п.). Например, в электроприводе с широким диапазоном регулирования частоты вращения «вниз» от номинальной целесообразно применение двигателей с независимой вентиляцией, например ИСО6, так как с уменьшением частоты вращения эффективность самовентиляции значительно снижается. Если эксплуатация двигателя предполагается во взрыво- или пожароопасной среде, то обязательно применение двигателя взрывозащищенного исполнения (см. 7.4).

Режим работы электропривода (см. 2.7) определяет требования к статическим и динамическим свойствам двигателя. Статические свойства опре-

деляются величиной статического момента сопротивления рабочей машины, требуемой частотой вращения, необходимостью регулирования частоты вращения и его диапазоном, возможностью кратковременных перегрузок и т.п. Динамические свойства определяются показателями переходных режимов: частотой пуска, реверса и торможения. Например, при частых пусках, торможении или реверсе требуется двигатель с малым моментом инерции ротора (якоря).

Большое значение при выборе двигателя имеют экономические требования: стоимость двигателя, его КПД и коэффициент мощности, масса и габариты, расходы по эксплуатации и ремонту. При оценке экономических показателей принимаемого варианта необходимо учитывать экономические показатели не только самого двигателя, но и используемых для его управления пускорегулирующих устройств (статических выпрямителей, регулируемых преобразователей, устройств «мягкого» пуска, защиты и т.п.).

20.2. Определение расчетной мощности и выбор двигателя

Расчетная мощность двигателя $P_{\text{расч}}$ (кВт), требуемая для электропривода, определяется величинами статического нагрузочного момента M_c (Н·м) на валу двигателя, создаваемого рабочей машиной, и требуемой частотой вращения вала двигателя n_2 (об/мин):

$$P_{\text{расч}} = 0,105 \cdot 10^{-3} M_c \frac{n_2}{\eta_{\text{мех}}}, \quad (20.1)$$

где $\eta_{\text{мех}}$ — КПД механизма с учетом редуктора.

Однако величина статического нагрузочного момента на валу двигателя, создаваемого рабочей машиной (установкой), не всегда известна, и ее расчет составляет определенные трудности. По этой причине расчетную мощность двигателя принято определять по технологическим параметрам установок. На современных предприятиях существует большое разнообразие производственных установок, различающихся назначением, устройством, реализуемыми технологическими процессами. Опыт проектирования электроприводов позволил выработать методы расчета требуемой расчетной мощности двигателя для ряда типовых установок, к которым можно отнести большинство видов производственных машин и механизмов. Ниже приведены упрощенные формулы для определения расчетной мощности двигателей некоторых типовых установок, работающих в продолжительном режиме S1 с неизменной нагрузкой.

Центробежные вентиляторы и насосы — это устройства, в которых перемещение газа или жидкости происходит под действием центробежных сил, возникающих при вращении рабочего колеса.

Расчетная мощность двигателя для привода центробежного вентилятора, кВт,

$$P_{\text{расч}} = \frac{QH \cdot 10^{-3}}{\eta_v \eta_n}, \quad (20.2)$$

где Q — производительность вентилятора (расход газа), м³/с; H — напор вентилятора (давление на выходе), Па; η_v и η_n — КПД соответственно вентилятора и механической передачи вращательного движения от двигателя на вентилятор.

Величины, входящие в (20.2), приводятся в каталоге на выбранный центробежный вентилятор.

Расчетная мощность для привода центробежного насоса, кВт,

$$P_{\text{расч}} = \frac{9,81 \cdot 10^{-3} \rho Q (H_c + \Delta H)}{\eta_n \eta_n}, \quad (20.3)$$

где ρ — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; Q — подача (производительность) насоса, м³/с; H_c — суммарный напор жидкости, т.е. наибольшая высота, на которую может подняться жидкость над точкой выхода из насоса, м; ΔH — потеря напора в магистрали, зависящая от сечения труб, их качества, протяженности, кривизны, м.

Расчетная мощность двигателя для привода поршневого компрессора, кВт,

$$P_{\text{расч}} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3} Q}{\eta_k \eta_n} (A_n + A_a), \quad (20.4)$$

где Q — подача (производительность) компрессора, м³/с; A_n и A_a — соответственно изотермическая и адиабатическая работа сжатия 1 м³ газа до давления P , Дж/м³.

Значения A_n и A_a для воздуха в зависимости от конечного давления сжатия приведены в табл. 20.1.

Таблица 20.1. Значения величин A_n и A_a в зависимости от давления воздуха

P , ат*	A_n , Дж/м ³	A_a , Дж/м ³
1,5	413	438
2,0	703	785
3,0	1121	1315
4,0	1417	1743
5,0	1641	2090
6,0	1825	2395
7,0	1988	2660
8,0	2120	2915
9,0	2243	3129
10,0	2345	3333

* 1 ат = 0,1 МПа.

20.2.1. Расчет мощности двигателя для продолжительного режима

Выбор конкретного типоразмера двигателя ведется на основании технических требований к электродвигателю: расчетной мощности, требуемой частоты вращения, режима работы, допустимых значений воздействия внешней температуры и влажности, вибрационных и ударных воздействий, климатических факторов, места размещения двигателя при эксплуатации и других возможных факторов. Выбор двигателя выполняют по таблицам основных технических данных выбранной серии, приведенным либо в данном справочнике (см. разделы, посвященные свойствам асинхронных, синхронных и двигателей постоянного тока), либо в каталогах на двигатели выбранных серий.

По указанным таблицам из ряда типоразмеров двигателей принятой серии выбирают типоразмер двигателя ближайшей большей номинальной мощности по отношению к рассчитанному значению, учитывающему режим работы электропривода.

Завышение требуемой мощности двигателя ведет к ухудшению его энергетических показателей (КПД и коэффициента мощности) и, как следствие, к увеличению непроизводительных потерь энергии и удорожанию эксплуатации двигателя. При этом также возрастают капитальные затраты.

Если же допустить *занижение* требуемой мощности двигателя, то его работа будет сопровождаться чрезмерным перегревом, что приведет к его преждевременному выходу из строя, непредвиденной остановке рабочего механизма, дополнительным расходам на ремонт или замену двигателя. Для обеспечения надежной работы двига-

теля необходимо также, чтобы перегрузочная способность и начальная величина пускового момента выбранного типоразмера двигателя соответствовали предъявляемым требованиям.

Значительный опыт расчета требуемой мощности двигателя позволил создать общепринятую методику подобных расчетов для различных номинальных режимов работы двигателей (см. 2.7).

1. Нагрузка продолжительная неизменная (см. рис. 2.11, а). Расчетная мощность двигателя определяется по (20.1). Затем по каталогу на предварительно выбранную серию двигателей определяют типоразмер двигателя с большим ближайшим значением номинальной мощности $P_{\text{ном}}$ требуемой частоты вращения $n_{\text{ном}}$.

При тяжелых условиях пуска и возможных перегрузках выбранный двигатель следует проверить на достаточность начального пускового момента и перегрузочную способность. Проверка двигателя на нагрев не требуется, поскольку нагрузка двигателя не превышает номинального значения, на которое проектировался двигатель, а следовательно, и нагрев двигателя не должен превышать допустимые значения.

■ **Пример 20.1.** Определить расчетную мощность двигателя для электропривода центробежного водяного ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) насоса, работающего в продолжительном режиме S1 с неизменной нагрузкой. Привод нерегулируемый, высота подачи воды $H = 40 \text{ м}$, часовая подача насоса 35 м^3 или $Q = 35/3600 = 0,0097 \text{ м}^3/\text{с}$. потеря напора в магистрали составляет $\Delta H = 10,5 \text{ м}$; требуемая частота вращения вала двигателя $n_2 = 1450 \pm 20 \text{ об/мин}$, КПД насоса $\eta_{\text{ном}} = 0,81$; сочленение вала двигателя с рабочим колесом насоса непосредственное ($\eta_n = 1$).

Условия эксплуатации: климат умеренный, категория размещения 3. Питающая

сеть — трехфазный переменный ток частотой 50 Гц, напряжением 380 В. Исполнение двигателя по способу монтажа: положение горизонтальное, крепление фланцевое со стороны выступающего конца вала. Требуется выбрать двигатель.

Решение. 1. Расчетная мощность двигателя (20.3)

$$P_{\text{расч}} = \frac{9,81 \cdot 10^{-3} \rho Q (H + \Delta H)}{\eta_n \eta_{\text{л}}} =$$

$$= \frac{9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 0,0097 (40 + 10,5)}{0,81 \cdot 1} =$$

$$= 5,93 \text{ кВт.}$$

2. По табл. 6.4 на асинхронные двигатели серии АИР (основное исполнение) выбираем двигатель АИР132S4 номинальной мощностью $P_{\text{ном}} = 7,5$ кВт; $s_{\text{ном}} = 4,0$; $\eta_{\text{ном}} = 87,5\%$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,86$; $\lambda_m = 2,5$; $\lambda_{\text{л}} = 2,0$; $\lambda_i = 7,5$; исполнение по способу защиты IP54, исполнение по способу монтажа IM3001 (двигатель с монтажным фланцем со стороны выступающего конца горизонтального вала). Скольжение двигателя при фактической (расчетной) нагрузке $P_{\text{расч}} = 5,93$ кВт,

$$s_{\text{расч}} = s_{\text{ном}} \frac{P_{\text{расч}}}{P_{\text{ном}}} = 0,04 \frac{5,93}{7,5} = 0,03.$$

Следовательно, частота вращения двигателя при расчетной нагрузке

$$n_{\text{расч}} = n_{\text{ном}} (1 - s_{\text{расч}}) = 1500 (1 - 0,03) =$$

$$= 1455 \text{ об/мин,}$$

что соответствует заданному диапазону частоты вращения насоса

$$n_2 = 1470 - 1430 \text{ об/мин.}$$

2. Нагрузка продолжительная переменная (см. рис. 2.11, б). Расчет номинальной мощности двигателя выполняют либо методом средних потерь, либо методом эквивалентных величин (мощности, момента или тока).

Метод средних потерь. Используя нагрузочную диаграмму, определяют среднее значение мощности, кВт,

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum P_x t_x}{\sum t_x}, \quad (20.5)$$

где

$$\sum P_x t_x = P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_N t_N;$$

$$\sum t_x = t_1 + t_2 + \dots + t_N.$$

Мощность на участках P_x с продолжительностью t_x задается нагрузочной диаграммой. Затем, используя полученное среднее значение мощности, по каталогу выбирают предварительную номинальную мощность двигателя, кВт,

$$P'_{\text{ном}} = (1,2 - 1,3) P_{\text{ср}} \quad (20.6)$$

и определяют соответствующие этой мощности значение КПД $\eta'_{\text{ном}}$ для предварительно выбранного двигателя, а затем рассчитывают потери при номинальной нагрузке, кВт,

$$\Delta P_{\text{ном}} = \frac{P'_{\text{ном}} (1 - \eta'_{\text{ном}})}{\eta'_{\text{ном}}}. \quad (20.7)$$

Определяют потери на участках нагрузочной диаграммы $P_1 P_2 \dots P_N$:

$$\Delta P_x = \frac{P_x (1 - \eta_x)}{\eta_x}. \quad (20.8)$$

Если в каталоге или справочнике на выбранный типоразмер двигателя приведены график или таблица зависимости КПД от нагрузки, например, как это сделано для серии ВЭМЗ (см. табл. 6.11), то определение η_x для разных значений мощности P_x не составляет труда. Если же таких данных нет, то полные потери $\Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}}$ для разных значений коэффициента нагрузки по току

$$\beta = \frac{I_x}{I_{\text{ном}}},$$

с некоторым приближением можно определить на участках нагрузочной диаграммы по формуле:

$$\Delta P_x = \Delta P_{\text{ном}} \frac{\gamma + \beta_x^2}{\gamma + 1}, \quad (20.9)$$

где γ — отношение постоянных потерь $\Delta P_{\text{пост}}$ к переменным $\Delta P_{\text{пер}}$:

$$\gamma = \frac{\Delta P_{\text{пост}}}{\Delta P_{\text{пер}}} \quad (20.10)$$

Приблизительные значения γ для различных двигателей:

Асинхронные двигатели общего назначения с короткозамкнутым ротором	0,5—0,7
Асинхронные двигатели крановые: с короткозамкнутым ротором	0,4—0,5
с фазным ротором	0,6—0,9
Двигатели постоянного тока независимого возбуждения	0,5—0,9
Двигатели постоянного тока крановые	1,0—1,5

Здесь бóльшие значения γ соответствуют двигателям большей мощности.

Затем в соответствии с нагрузочной диаграммой определяют средние потери двигателя, кВт,

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\sum \Delta P_x t_x}{\sum t_x}, \quad (20.11)$$

где

$$\sum \Delta P_x t_x = \Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_N t_N. \quad (20.12)$$

Полученное значение $\Delta P_{\text{ср}}$ должно быть не больше номинальных потерь предварительно выбранного двигателя $\Delta P_{\text{ном}}$ [см. (20.7)]. В этом случае предварительно выбранный типоразмер принимают за окончательный. Если же оказалось, что $\Delta P_{\text{ср}} > \Delta P_{\text{ном}}$, то по таблице технических данных этой же серии двигателей выбирают двигатель смежного типоразмера большей мощности и повторяют расчет. Окончательно выбранный типоразмер двигателя следует проверить на величину начального пускового момента и перегрузочную способность (см. 20.3). Поскольку

в принятом типоразмере средние потери не превышают величину номинальных потерь, проверки двигателя на нагрев не требуется.

■ **Пример 20.2.** Для электропривода главного движения токарного станка (вращение шпинделя) необходим трехфазный асинхронный двигатель общего назначения. Питаящая сеть — трехфазный переменный ток частотой 50 Гц, напряжением 380 В. Исполнение двигателя по способу монтажа: положение вала горизонтальное, крепление фланцевое со стороны выступающего конца вала. Двигатель нерегулируемый, частота вращения в режиме номинальной нагрузки 1460 ± 15 об/мин.

Режим работы электропривода продолжительный S1 с переменной нагрузкой. Нагрузочная диаграмма привода представлена на рис. 2.11, б; значения мощности P_x (кВт) и времени t_x (мин) на участках этой диаграммы:

$$P_1 = 14; \quad P_2 = 10; \quad P_3 = 12; \quad P_4 = 17; \quad P_5 = 7; \\ t_1 = 6; \quad t_2 = 6; \quad t_3 = 4; \quad t_4 = 4; \quad t_5 = 8.$$

Пуск двигателя выполняется без нагрузки. Требуется выбрать двигатель.

Решение. Решаем задачу методом средних потерь.

1. Среднее значение мощности (20.5):

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum P_x t_x}{\sum t_x} = \frac{316}{28} = 11,28 \text{ кВт},$$

где

$$\sum P_x t_x = 14 \cdot 6 + 10 \cdot 6 + 12 \cdot 4 + 17 \cdot 4 + 7 \cdot 8 = 316;$$

$$\sum t_x = 6 + 6 + 4 + 4 + 8 = 28 \text{ мин.}$$

2. Принимаем предварительно двигатель номинальной мощностью (20.6)

$$P'_{\text{ном}} = (1,2 - 1,3) P_{\text{ср}} = 1,25 \cdot 11,28 = 14,2 \text{ кВт.}$$

По табл. 6.1 технических данных трехфазных асинхронных двигателей серии 4А (основное исполнение) принимаем двигатель 4А160S4У3 номинальной мощнос-

тью $P'_{ном} = 15$ кВт; номинальная частота вращения $n_{ном} = 1460$ об/мин; КПД $\eta_{ном} = 88,5\%$; перегрузочная способность $\lambda_m = 2,3$; кратность пускового момента $\lambda_{п} = 1,4$; кратность пускового тока $\lambda_I = 7,0$.

3. Коэффициент нагрузки в квадрате β^2 для участков нагрузочной диаграммы: $\beta_1^2 = 0,93$; $\beta_2^2 = 0,66$; $\beta_3^2 = 0,80$; $\beta_4^2 = 1,13$; $\beta_5^2 = 0,47$.

4. Для трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором общего назначения принимаем отношение постоянных потерь к переменным, равным $= 0,5$.

5. Потери при номинальной нагрузке (20.7)

$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном}(1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном}} = \frac{15(1 - 0,885)}{0,885} = 1,95 \text{ кВт.}$$

6. Определяем потери для участков нагрузочной диаграммы (20.9)

$$\Delta P_1 = \Delta P_{ном} \frac{\gamma + \beta_1^2}{\gamma + 1} = 1,95 \frac{0,5 + 0,93}{0,5 + 1} = 1,86 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_2 = 1,95 \frac{0,5 + 0,66}{1,5} = 1,51 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_3 = 1,95 \frac{0,5 + 0,80}{1,5} = 1,69 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_4 = 1,95 \frac{0,5 + 1,13}{1,5} = 2,12 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_5 = 1,95 \frac{0,5 + 0,47}{1,5} = 1,26 \text{ кВт.}$$

7. Средние потери двигателя (20.11)

$$\Delta P_{ср} = \frac{\sum \Delta P_x t_x}{\sum t_x} = \frac{45,54}{28} = 1,63 \text{ кВт,}$$

где

$$\sum \Delta P_x t_x = 1,86 \cdot 6 + 1,51 \cdot 6 + 1,69 \cdot 4 + 2,12 \cdot 4 + 1,26 \cdot 8 = 45,54.$$

8. В связи с тем, что средние потери меньше номинальных потерь ($1,63 < 1,95$), пересчета мощности двигателя не требуется.

9. Наибольшая мощность по нагрузочной диаграмме $P_4 = 17$ кВт, что превышает

номинальную мощность выбранного двигателя, поэтому требуется проверка двигателя на перегрузочную способность.

Частота вращения на участке $P_4 = 17$ кВт равна

$$n_4 = n_{ном} \frac{P_{ном}}{P_4} = 1460 \frac{15}{17} = 1288 \text{ об/мин.}$$

Момент двигателя на четвертом участке нагрузочной диаграммы при $P_4 = 17$ кВт:

$$M_4 = 9,55 \frac{P_4}{n_4} = 9,55 \frac{17000}{1288} = 126 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Момент двигателя при номинальной мощности $P_{ном} = 15$ кВт:

$$M_{ном} = 9,55 \frac{15000}{1460} = 98,1 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Таким образом, превышение момента на четвертом участке диаграммы над номинальным составляет $126/98,1 = 1,28$. Перегрузочная способность выбранного двигателя при номинальной нагрузке равна $\lambda_m = 2,3$. Следовательно, на четвертом участке диаграммы перегрузочная способность двигателя уменьшена в 1,28 раза и составляет $2,3/1,28 = 1,79$, т.е. устойчивая работа двигателя обеспечена.

Окончательно принимаем предварительно выбранный типоразмер 4А160S4УЗ с номинальными значениями мощности 15 кВт и частоты вращения 1460 об/мин; исполнения по способу защиты IP44; исполнения по способу монтажа IM3001; кратность пускового момента 1,4; перегрузочная способность 2,3.

Следует отметить, что выбор мощности двигателя по участку нагрузочной диаграммы с наибольшим значением мощности (участок $P_4 = 17$ кВт, по каталогу ближайшее значение $P_{ном} = 18,5$ кВт) был бы ошибочным, так как это привело бы к значительному недоиспользованию двигателя по мощности, а следовательно, вызвало бы увеличение капитальных затрат на электропривод и снижение его экономических показателей (КПД и коэффициента мощности).

Метод средних потерь универсален и применим для всех режимов работы двигателей. Он является более точным по сравнению с методом эквивалентных величин, хотя и более трудоемок.

Метод эквивалентных величин. Эквивалентными считают такие условные значения тока, момента или мощности, при которых величина потерь в двигателе, работающем в продолжительном режиме с неизменной нагрузкой, равна потерям мощности при его работе в реальных условиях продолжительного режима с переменной нагрузкой.

Рассмотрим сначала *метод эквивалентного тока*, который основан на замене изменяющегося во времени тока нагрузки двигателя неизменным эквивалентным током,

$$I_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}}. \quad (20.13)$$

Так как эквивалентный ток создается в двигателе такие же потери, что и фактические токи нагрузки, это дает основание по каталогу выбрать типоразмер двигателя, номинальный ток которого равен или несколько больше эквивалентного тока. Выбранный типоразмер двигателя следует проверить по перегрузочной способности и на величину пускового момента.

Метод эквивалентного тока применим лишь при постоянстве мощности магнитных и механических потерь, а также постоянстве сопротивления обмоток в течение всего рабочего цикла. Такому условию, например, не удовлетворяют двигатели последовательного возбуждения, у которых при изменениях нагрузки в значительной степени меняются основной магнитный поток и частота вращения, а следова-

тельно, изменяются магнитные и механические потери.

Более универсальным является метод *эквивалентного момента*

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}}. \quad (20.14)$$

Наиболее простым является метод *эквивалентной мощности*, когда расчет эквивалентной мощности ведется непосредственно по нагрузочной диаграмме

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}}. \quad (20.15)$$

Метод эквивалентной мощности может быть успешно применен для двигателей постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения и асинхронных двигателей, работающих на естественной механической характеристике, а также синхронных двигателей.

■ **Пример 20.3.** Для условий примера 20.2 рассчитать требуемую мощность и выбрать двигатель; задачу решить методом эквивалентной мощности.

Решение. Эквивалентная мощность (20.15)

$$\begin{aligned} P_{\text{ж}} &= \sqrt{\frac{14^2 \cdot 6 + 10^2 \cdot 6 + 12^2 \cdot 4 + 17^2 \cdot 4 + 7^2 \cdot 8}{6 + 6 + 4 + 4 + 8}} = \\ &= 11,8 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

По табл. 6.1 технических данных трехфазных асинхронных двигателей серии 4А (основное исполнение) выбираем двигатель с ближайшей большей номинальной мощностью 15 кВт, типоразмер 4А160S4У3 такой же, что и в примере 20.2.

Расчет требуемой мощности двигателя методом эквивалентных величин менее трудоемок по сравнению с ме-

тодом средних потерь, но уступает ему в точности.

20.2.2. Расчет мощности двигателя для кратковременного режима

Задача расчета сводится к определению мощности двигателя $P'_{\text{ном.кр}}$, способного выдержать перегрузку $P_{\text{кр}}$, работая в кратковременном режиме в течение времени $t_{\text{кр}}$ (см. рис. 2.11, в). При этом перегрев двигателя не должен превысить значения $\tau_{\text{уст}}$, соответствующего продолжительному режиму работы этого двигателя с номинальной нагрузкой $P_{\text{ном}}$ (см. рис. 2.11, а). Полученная в результате расчета мощность $P'_{\text{ном.кр}}$ меньше мощности кратковременного режима $P_{\text{кр}}$ на величину коэффициента механической перегрузки p_m :

$$P'_{\text{ном.кр}} = \frac{P_{\text{кр}}}{p_m}. \quad (20.16)$$

Допустим, нагрузочная диаграмма кратковременного режима содержит две ступени нагрузки (рис. 20.1, а). В этом случае мощность $P_{\text{кр}}$ определяют методом средних потерь.

Коэффициент механической перегрузки по мощности определяют по графику $p_m = f(t^*)$ (рис. 20.1, б), где $t^* = t_p / T_n$ — относительное значение времени работы кратковременного

режима ($t_p = t_1 + t_2$); T_n — постоянная времени нагревания.

Установлено, что при $t^* < 0,35$ нагрузка двигателя в кратковременном режиме $P_{\text{кр}}$ превышает номинальную мощность выбранного двигателя $P_{\text{ном}}$ в 2,5 раза и более. При этом перегрузочная способность двигателя обычно не удовлетворяет требованиям электропривода. Поэтому при $t^* \leq 0,35$ двигатель выбирают по требуемой для кратковременного режима перегрузочной способности двигателя λ_m . Например, если постоянная времени нагревания двигателя $T_n = 30$ мин, то начиная с $t_{\text{кр}} = 30 \cdot 0,35 = 10,5$ мин и меньше двигатель следует выбирать по требуемой перегрузочной способности.

■ **Пример 20.4.** Для электропривода заслонки трубопровода требуется трехфазный асинхронный двигатель с частотой вращения $n_2 = 930 \pm 20$ об/мин. Режим работы кратковременный $t_p = 15$ мин, статический момент сопротивления на валу двигателя реактивный $M_c = 70$ Н·м; двигатель должен быть закрытого исполнения, способ монтажа IM1001, климатические условия и место размещения УЗ.

Решение. 1. Требуемая мощность двигателя

$$P_{\text{кр}} = 0,105 \cdot 10^{-3} M_c n_2 = \\ = 0,105 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 930 = 6,84 \text{ кВт.}$$

2. Выбираем двигатель серии 4А (основное исполнение), степень защиты IP44;

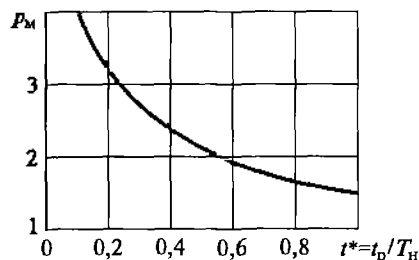
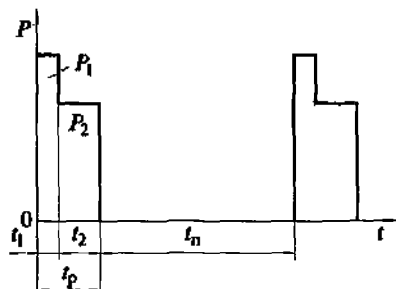


Рис. 20.1. Нагрузочная диаграмма кратковременного режима работы (а) и график для определения коэффициента механической перегрузки p_m (б)

постоянная нагревания $T_n = 30$ мин, относительное значение времени рабочего цикла $i^* = t_r/T_n = 15/30 = 0,5$.

3. По графику рис. 20.1, б определяем коэффициент механической перегрузки $p_m = 2,1$; мощность двигателя продолжительного режима, используемого в кратковременном режиме (20.16):

$$P'_{ном.кр} = P_{кр}/p_m = 6,84/2,1 = 3,25 \text{ кВт.}$$

4. По каталогу двигателей серии 4А (основное исполнение) принимаем двигатель типа 4А112МВ6У3 номинальной мощностью $P_{ном} = 4,0$ кВт, номинальным скольжением 5,1 %, перегрузочной способностью 2,2; кратность пускового момента 2.

5. Учитывая перегрузку двигателя, определяем частоту вращения при кратковременной нагрузке $P_{кр} = 7,0$ кВт

$$\begin{aligned} n'_{ном} &= n_1 - P_{кр} \frac{n_1 \sim n_{ном}}{P_{ном}} = \\ &= 1000 - 6,84 \frac{1000 - 949}{4,0} = 913 \text{ об/мин,} \end{aligned}$$

где $n_{ном}$ — частота вращения двигателя в продолжительном номинальном режиме

$$n_{ном} = 1000(1 - 0,051) = 949 \text{ об/мин.}$$

6. Момент на валу двигателя, соответствующий кратковременной нагрузке $P_{кр} = 6,84$ кВт и частоте вращения $n_{кр} = 913$ об/мин,

$$M_{кр} = 9,55 \cdot 10^3 \frac{6,84}{913} = 71,5 \text{ Н} \cdot \text{м,}$$

т.е. момент на валу двигателя при кратковременной нагрузке $P_{кр} = 6,84$ кВт превышает заданное значение статического нагрузочного момента, $M_{кр} > M_c$.

7. Номинальный вращающий момент двигателя в продолжительном режиме

$$\begin{aligned} M_{ном} &= 9,55 \cdot 10^3 \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = \\ &= 9,55 \cdot 10^3 \frac{4,0}{949} = 40,2 \text{ Н} \cdot \text{м.} \end{aligned}$$

8. Максимальный момент двигателя

$$M_{max} = 40,2 \cdot 2,2 = 88,44 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

9. Действительная перегрузочная способность двигателя

$$\frac{M_{max}}{M_c} = \frac{88,44}{70} = 1,26.$$

При возможном уменьшении напряжения сети на 5 % перегрузочная способность составит

$$1,26 \cdot 0,95^2 = 1,14.$$

10. Пусковой момент двигателя $M_n = 40,2 \cdot 2 = 80,4$ Н·м, что превышает статический момент $M_c = 70$ Н·м. Следовательно, выбранный двигатель удовлетворяет требованиям электропривода по пусковому моменту и перегрузочной способности.

11. Проверка двигателя по минимальному моменту: для выбранного двигателя кратность минимального момента $M_{min}/M_{ном} = 1,8$, следовательно, $M_{min} = 1,8 M_{ном} = 1,8 \cdot 40,2 = 72,4$ Н·м, что превышает статистический момент нагрузки $M_c = 70$ Н·м.

20.2.3. Расчет мощности двигателей при повторно-кратковременном режиме работы

В общем случае каждый период работы t_p нагрузочной диаграммы повторно-кратковременного режима (ПКР) может иметь несколько ступеней (рис. 20.2). Для приведения такой диаграммы к виду рис. 2.11, з по (20.15)

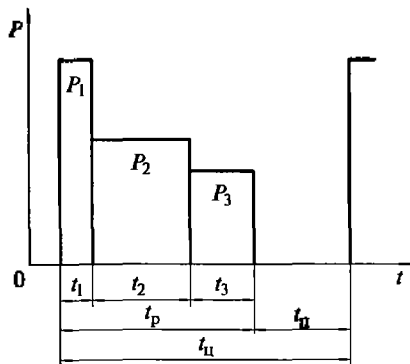


Рис. 20.2. Трехступенчатая нагрузочная диаграмма повторно-кратковременного режима

рассчитывают эквивалентную по нагреву мощность одного цикла (без учета паузы t_n).

Расчетное значение относительной продолжительности включения

$$ПВ' = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} 100, \quad (20.17)$$

где $t_{\text{ц}}$ — продолжительность цикла;

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_n.$$

Для двигателей с самовентиляцией, у которых эффективность охлаждения зависит от частоты вращения, при определении расчетного значения продолжительности включения ПВ' необходимо учитывать ухудшение охлаждения при пуске и во время паузы t_n (остановки) введением коэффициентов α и β при расчете продолжительности цикла:

$$t_{\text{ц}} = \alpha t_{\text{пуск}} + t_p + \beta t_n. \quad (20.18)$$

При пуске, торможении и остановке для асинхронных двигателей $\alpha = 0,5$; $\beta = 0,50$; для двигателей постоянного тока $\alpha = 0,75$; $\beta = 0,50$.

Если $t_{\text{пуск}}$ и $t_{\text{торм}}$ не выделены на нагрузочной диаграмме, продолжительность цикла определяют по формуле

$$t_{\text{ц}} = t_p + \beta t_n.$$

При $ПВ' < 10\%$ расчет мощности ведут как для кратковременного режима работы, а если $ПВ' > 60\%$ или продолжительность цикла $t_{\text{ц}} > 10$ мин, расчет мощности двигателя ведут как для продолжительного режима работы с переменной нагрузкой. Если же $10\% \leq ПВ' \leq 60\%$, то эквивалентную мощность $P_{\text{эк}}$ пересчитывают на номинальную мощность повторно-кратковременного режима $P_{\text{пкр}}$, соответствующую ближайшему из номинальных значений $ПВ = 15; 25; 40$ или 60% ,

$$P_{\text{пкр}} = P_{\text{эк}} \sqrt{\frac{ПВ'}{ПВ}}. \quad (20.19)$$

По полученным значениям $P_{\text{пкр}}$ и ПВ выбирают двигатель постоянного или переменного тока серий, предназначенных для работы в повторно-кратковременном режиме, например, двигатели краново-металлургических серий постоянного тока или асинхронные. Эти двигатели обладают повышенной перегрузочной способностью и большим пусковым моментом при сравнительно небольших пусковых токах. Пониженная величина момента инерции ротора (якоря) обеспечивает этим двигателям улучшенные динамические свойства, что является важным качеством при повторно-кратковременном режиме работы. В каталогах этих серий указана номинальная мощность для каждого номинального значения продолжительности включения ПВ либо для $ПВ = 40\%$. При необходимости выбора мощности двигателя для других значений $ПВ_x$ следует воспользоваться формулой

$$P_x = P_{40} \sqrt{\frac{40}{ПВ_x}}. \quad (20.20)$$

Как известно, пуск и торможение двигателей происходят при токах, обычно превышающих их номинальные значения. Поэтому при частых пусках и торможениях происходит интенсивный перегрев двигателя. Особенно сильно влияние этих процессов в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором, у которых пусковой ток в 5—7 раз превышает номинальный. В связи с этим для двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме, вводится понятие допустимого числа включений в час, которое приводится в каталогах на

двигатели, работающие в режиме частых пусков, например лифтовых.

После выбора двигателя по каталогу и проверки его на величину пускового момента и перегрузочную способность определяют число включений в час

$$h = \frac{3600}{t_{\text{ц}}},$$

где $t_{\text{ц}}$ — продолжительность цикла, с.

Затем сравнивают его с допустимым числом пусков данной серии $h_{\text{доп}}$. Например, у асинхронных двигателей для привода лифтов допустимое число пусков в час составляет от 120 до 200 (см. табл. 7.14). При этом число пусков в час 200 допускается лишь при независимой вентиляции двигателя.

Если режим работы предусматривает электрическое торможение, особенно противовключением, то допустимое число пусков следует уменьшить в 2—3 раза.

При отсутствии значительных нагрузок возможно применение в электроприводах с повторно-кратковременным режимом работы двигателей общего назначения, предназначенных для продолжительного режима работы. В этом случае номинальная мощность двигателя $P_{\text{ном}}$, указанная в каталоге, должна быть увеличена до значения $P_{\text{пкр}}$ в соответствии с ПВ:

$$P_{\text{пкр}} = P_{\text{ном}} k_p, \quad (20.21)$$

где

$$k_p = \sqrt{\frac{100}{\text{ПВ}}}. \quad (20.22)$$

Использование двигателей, предназначенных для продолжительного режима, в повторно-кратковременном режиме вместо специальных двигателей, предназначенных для этого режима, ведет к снижению надежности

электропривода и его энергетических показателей. Объясняется это тем, что двигатели для продолжительного режима по сравнению с двигателями для повторно-кратковременного режима имеют меньшие значения пускового момента и перегрузочной способности, больший момент инерции ротора (якоря), меньший диаметр вала и меньший ресурс подшипников.

■ **Пример 20.5.** Для электропривода подъемного механизма необходимо рассчитать мощность двигателя методом эквивалентного момента и выбрать трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии МТКН для повторно-кратковременного режима работы S3 в соответствии с нагрузочной диаграммой, аналогичной диаграмме, представленной на рис. 20.2, где $M_1 = 327 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_2 = 205 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_3 = 164 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $t_1 = 4 \text{ с}$; $t_2 = 8 \text{ с}$; $t_3 = 15 \text{ с}$; $t_{\text{ц}} = 120 \text{ с}$; частота вращения $700 \pm 10 \text{ об/мин}$; пуск двигателя под нагрузкой.

Решение. 1. Эквивалентный момент (20.14)

$$\begin{aligned} M_{\text{эк}} &= \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \\ &= \sqrt{\frac{327^2 \cdot 4 + 205^2 \cdot 8 + 164^2 \cdot 15}{4 + 8 + 15}} = \\ &= 208 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Эквивалентная мощность двигателя

$$\begin{aligned} P_{\text{эк}} &= 0,105 M_{\text{эк}} n_{\text{ном}} = 0,105 \cdot 208 \cdot 700 = \\ &= 15\,288 \text{ Вт} = 15,3 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

2. Продолжительность цикла

$$t_{\text{ц}} = t_p + \beta t_{\text{н}} = 27 + 0,5 \cdot 120 = 87 \text{ с}.$$

3. Расчетное значение ПВ' (20.17)

$$\text{ПВ}' = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} 100 = \frac{27}{87} 100 = 31 \, \%.$$

4. Мощность двигателя при номинальном ПВ = 40 % (20.19)

$$P_{\text{пкр}} = P_{\text{эк}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}'}{40}} = 15,3 \sqrt{\frac{31}{40}} = 13,5 \text{ кВт}.$$

5. По табл. 7.4 выбираем типоразмер МТКН-411-8 с номинальными данными: $P_{\text{ном}} = 15$ кВт при ПВ = 40 %; 220/380 В; $n_{\text{ном}} = 695$ об/мин; $n_1 = 750$ об/мин.

Номинальный, максимальный и пусковой моменты на валу двигателя

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \frac{15\,000}{695} = 206 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{max}} = 657 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{\text{п}} = 638 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6. Частота вращения на ступени диаграммы $M_1 = 327 \text{ Н} \cdot \text{м}$:

$$\begin{aligned} n &= n_1 - \frac{M_1}{M_{\text{ном}}} (n_1 - n_{\text{ном}}) = \\ &= 750 - \frac{327}{206} (750 - 695) = 663 \text{ об/мин.} \end{aligned}$$

7. Наибольший момент на валу двигателя $M_1 = M_{\text{наиб}} = 327 \text{ Н} \cdot \text{м}$, т.е. $M_{\text{наиб}} < M_{\text{п}}$.

8. Перегрузочная способность двигателя

$$\lambda_{\text{к}} = \frac{657}{327} = 2,01.$$

Таким образом, выбранный двигатель по пусковому моменту и перегрузочной способности удовлетворяет заданным условиям.

20.3. Проверка двигателей на достаточность пускового момента и перегрузочную способность

Выбранный для электропривода двигатель необходимо проверить на достаточность начального пускового момента и перегрузочную способность.

Двигатели переменного тока (асинхронные и синхронные) имеют *физический предел* начального пускового и максимального моментов. Поэтому при заданном значении напряжения сети эти двигатели не могут создать моментов, превышающих значений, указанных в каталоге (исключение составля-

ют асинхронные двигатели с фазным ротором, допускающие изменение пускового момента). Если статический нагрузочный момент M_c превышает значение начального пускового момента данного двигателя $M_{\text{п}}$, то при включении в сеть пуск двигателя не произойдет. В каталогах на асинхронные двигатели по каждому типоразмеру указаны значения кратности пускового момента $\lambda_{\text{п}} = M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$.

Если на какой-либо ступени нагрузочной диаграммы мощность P_x отличается от номинальной, то частота вращения для этого неноминального режима, об/мин,

$$n = n_1 - \frac{P_x}{P_{\text{ном}}} (n_1 - n_{\text{ном}}).$$

Двигатели постоянного тока не имеют *физического предела* электромагнитного момента. Предельное допустимое значение момента определяется степенью коммутации, которая может быть кратковременно допущена в этом двигателе, не вызывая необратимых процессов в щеточно-коллекторном узле (например, оплавление коллектора). Другими словами, предельные значения перегрузочной способности и пускового момента в двигателях постоянного тока определяются предельно допустимым значением тока перегрузки.

Проверка двигателей постоянного тока на перегрузочную способность состоит в сравнении наибольшего значения тока, соответствующего наибольшей нагрузке по нагрузочной диаграмме $I_{\text{н.д}}$ с предельно допустимым током для данного типоразмера двигателя. В описаниях ряда серий двигателей постоянного тока приводятся предельно допустимые значения тока.

Если в каталоге не указано значение предельно допустимого тока, то

можно руководствоваться указаниями действующего стандарта: допускается перегрузка двигателей постоянного тока (по току) на 50 % в течение 1 мин, а для асинхронных двигателей перегрузка по току на 50 % в течение 2 мин.

При токах, превышающих предельно допустимые значения, появляется опасность возникновения в двигателях постоянного тока кругового огня на коллекторе.

Необходимо также иметь в виду, что в соответствии с действующим стандартом в электрических сетях, питающих электродвигатели, допустимые отклонения напряжения составляют $\pm 5\%$. Как известно, пусковой и максимальный моменты асинхронных двигателей пропорциональны квадрату напряжения. Поэтому при снижении напряжения сети на 5 % эти моменты уменьшатся на $1 - (0,95)^2 = 0,1$, т.е. на 10 %.

Если выбранный типоразмер двигателя не удовлетворяет требованиям электропривода, то следует принять следующий (смежный) типоразмер большей мощности и произвести проверку на достаточность начального пускового момента и перегрузочной способности.

Если по условиям работы электропривода пуск двигателя осуществляется без нагрузки, то проверку на начальный пусковой момент не делают.

Таким образом, в результате выбора типоразмера двигателя получают о нем следующую информацию: серия и типоразмер, номинальные данные, перегрузочная способность, кратности пускового момента и пускового тока, исполнение двигателя по способам защиты, монтажа, охлаждения, климатическое исполнение, категория размещения при эксплуатации, габаритные, установочные и присоединительные размеры.

ГЛАВА 21

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

21.1. Основные понятия и определения

После того как электрическую машину изготовили и испытали по соответствующей программе, она передается заказчику. С этого времени начинается эксплуатация электрической машины, которая заканчивается обычно спустя несколько лет ее утилизацией. Таким образом, процесс эксплуатации электрической машины состоит из нескольких этапов: транспортировка с завода-изготовителя на склад предприятия-заказчика, хранение на

складе предприятия-заказчика, монтаж на месте ее эксплуатации, пробный пуск и сдача для работы в электроприводе, техническое обслуживание в течение всего времени эксплуатации, ремонты (текущие, средние, капитальные).

Техническое обслуживание — это организационные и технические мероприятия, выполняемые в процессе эксплуатации электрической машины, направленные на поддержание ее работоспособности с технико-экономическими параметрами, указанными в паспорте этой машины.

Электрические машины подразделяют на *ремонтпригодные* и *неремонтпригодные*. При износе неремонтпригодной машины ее заменяют новой. Ремонтпригодные электрические машины периодически ремонтируют с целью восстановления их технических параметров. Существующие виды ремонта разделяют по объему, назначению и способам организации. По объему ремонты делят на текущие, средние и капитальные.

Текущий ремонт проводят во время эксплуатации электрической машины. Такой ремонт состоит в замене износившихся частей машины и ее регулировке (например, замена контактных щеток, их притирка к коллектору или контактными кольцам и регулировка силы их прижатия).

При **среднем ремонте** производят частичную разборку электрической машины и замену изношенных деталей и узлов. В результате такого ремонта технические параметры машины должны быть восстановлены.

При **капитальном ремонте** производят полную разборку машины с заменой или восстановлением любых ее частей, включая обмотки. При капитальном ремонте ресурс машины должен быть восстановлен.

Основные организационные и технические положения при выполнении мероприятий, связанных с эксплуатацией электромеханического оборудования, включая его ремонты, изложены в [1].

21.2. Виды износа электрических машин

В процессе работы электрическая машина изнашивается. Различают три вида износа электрических машин: ме-

ханический, электрический и моральный.

Механический износ является следствием механических воздействий. Такому износу подвержены коллектор, контактные кольца, щетки, подшипники, шейки валов (в машинах с подшипниками скольжения). Кроме того, под воздействием твердых частиц пыли, проникающей в машину, происходит абразивный износ изоляции обмоток. Это относится в первую очередь к лобовым частям обмоток, расположенным на пути воздушного потока, направляемого вентиляторами.

Электрический износ ведет к невосстановливаемой утрате свойств электрической изоляции. Происходит это из-за тепловых, электрических и механических воздействий на изоляционные материалы. *Тепловые воздействия* неминуемо связаны с работой электрической машины, сопровождаемой потерями энергии, которые вызывают нагрев машины. Но это воздействие становится наиболее разрушительным при перегревах машины до температур, превышающих допустимые значения для класса нагревостойкости данного изоляционного материала (см. 2.6). Тепловое влияние снижает эластичность изоляции, делает ее более подверженной разрушительному действию механических сил.

Причинами *электрического воздействия* на изоляцию являются возникающие в машине перенапряжения. Это в первую очередь относится к коммутационным перенапряжениям, способным вызвать пробой межвитковой изоляции обмотки. Перенапряжения могут возникать при питании электродвигателя от частотного преобразователя с широтно-импульсной модуляцией.

Механические воздействия на изоляцию возникают из-за вибраций ма-

шины или при действии на обмотку знакопеременных электродинамических сил при прохождении по этим обмоткам переменного тока, из-за действия центробежных сил на якорь. Механические действия на изоляцию многократно усиливаются в аварийных ситуациях, главным образом в режиме короткого замыкания, когда токи в обмотках возрастают многократно. Износ изоляции обмоток электрических машин особенно нежелателен, так как он требует либо выполнения капитального ремонта машины, либо ее замены.

Моральный износ электрической машины связан с разработкой и внедрением в производство новых электрических машин с более высокими технико-экономическими показателями. При этом эксплуатируемые электрические машины оказываются устаревшими и их дальнейшая эксплуатация становится нерентабельной. Моральный износ является следствием технического прогресса.

Приведенная детализация видов и причин износа электрических машин облегчает выявление факторов износа при эксплуатации машины.

21.3. Подготовка и пробный пуск электродвигателя

Установке двигателя для эксплуатации предшествует *выбор места* этой установки. При этом необходимо учесть следующее:

а) место установки двигателя должно исключить возможность попадания на его обмотки и токосъемные устройства воды, масла, эмульсии и т. п.; вибрации фундаментов и частей здания не должны превышать значений, допустимых для выбранного двигателя;

б) шум, создаваемый двигателем совместно с приводимым механизмом, не должен превышать уровня, допустимого санитарными нормами для места эксплуатации электропривода;

в) проходы для обслуживания электропривода между фундаментами или корпусами двигателей должны быть не менее допустимых значений, обеспечивающих нормальное обслуживание, указанных в гл. 5.1 «Правила устройства электроустановок» [14];

г) двигатели и аппараты управления ими, имеющие степень защиты ниже IP44, а также резисторы всех исполнений по степени защиты должны быть установлены на расстоянии не менее 1 м от конструкций здания, выполненных из *сгораемых* материалов;

д) двигатели на напряжение питания выше 1 кВ разрешается устанавливать непосредственно в производственных помещениях; при расположении выводов обмотки под статором двигателя следует устанавливать на фундаменте со специальной камерой, т. е. фундаментной ямой, которая должна удовлетворять требованиям, изложенным в гл. 4.2 «Правила устройства электроустановок» [14].

Далее следует подготовка двигателя к пробному пуску. При этом необходимо выполнить определенный комплекс работ.

1. Осмотр двигателя. Проверить соответствие записи на металлической пластине, прикрепленной к корпусу двигателя, записям в техническом паспорте на этот двигатель. Затем приступить к осмотру двигателя. При этом необходимо проверить состояние наружной поверхности двигателя, обратив внимание на состояние покрытия, на отсутствие каких-либо повреждений (вмятин, трещин) на корпусе, под-

шипниковых щитах и крышках, на выходных концах вала; проверить наличие рым-болтов, заземляющих болтов, наличие и достаточность затяжки всех крепежных болтов на подшипниковых щитах и крышках, кожухе вентилятора, жалюзи, люках; снять крышку коробки выводов и проверить состояние клемм (шпилек) и достаточность затяжки гаек, крепящих наконечники выводов обмоток к шпилькам панели коробки выводов.

Необходимо проверить обозначение (маркировку) выводов электрической

машины. В соответствии с действующими стандартами принято обозначение выводов электрических машин, приведенное в табл. 21.1. В многоскоростных асинхронных двигателях, у которых несколько обмоток статора, в обозначение выводов введена цифра перед буквой С, указывающая на число полюсов в данной обмотке. Например, выводы 2С1, 2С2, 2С3 принадлежат двухполюсной обмотке статора ($2p = 2$), а выводы 4С1, 4С2, 4С3 — четырехполюсной обмотке статора ($2p = 4$) и т.д.

Таблица 21.1. Обозначение выводов обмоток электрических машин

Наименование обмоток	Число выводов	Фазы обмотки	Начала обмоток	Концы обмоток
<i>Трехфазные асинхронные и синхронные машины</i>				
Обмотка статора — фазные обмотки не соединены	6	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	С1 С2 С3	С4 С5 С6
Фазные обмотки соединены «звездой»	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	С1 С2 С3	Нулевая точка
Фазные обмотки соединены «треугольником»	3	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	С1 С2 С3	—
Обмотка ротора асинхронной машины	3	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	Р1 Р2 Р3	—
Обмотка возбуждения (индуктора) синхронной машины	2	—	И1	И2
<i>Однофазные асинхронные и синхронные машины</i>				
Обмотка статора	4	Главная Вспомогательная	С1 В1	С2 В2
<i>Коллекторные машины</i>				
Обмотка якоря	2	—	Я1	Я2
Обмотка компенсационная	2	—	К1	К2
Обмотка добавочных полюсов	2	—	Д1	Д2
Обмотки возбуждения:				
независимая	2	—	Н1	Н2
параллельная (шунтовая)	2	—	Ш1	Ш2
последовательная (сериесная)	2	—	С1	С2

В двигателях постоянного тока кроме перечисленного следует проверить: состояние коллектора (отсутствие вмятин, царапин, чистота поверхности); крепление щеточной траверсы; щеткодержатели (исправность пружин) и их шахматное расположение по длине коллектора; отсутствие сколов на щетках и притирку щеток к коллектору. Проверить затяжку крепящих болтов и других элементов двигателя. В процессе осмотра поверхность машины следует протереть сухой тряпкой, а внутреннюю полость продуть сжатым воздухом.

2. Проверка свободного вращения вала «от руки». При повороте свободного конца вала ротор (якорь) двигателя должен вращаться без каких-либо задеваний (о чем свидетельствуют характерные звуки) и заклинивания. Ротор двигателя должен сделать несколько оборотов. Если имеют место перечисленные неполадки, то это указывает на повреждения, полученные двигателем при транспортировке: нарушение воздушного зазора между статором и ротором (якорем), неполадки в подшипниках. В этом случае двигатель следует разобрать, найти и устранить повреждения.

3. Присоединение заземляющих проводов (шин). Заземляющих проводов должно быть не менее двух (по количеству заземляющих болтов на двигателе); место присоединения заземляющих проводов (шин) должно быть очищено от краски, ржавчины либо другого загрязнения.

4. Измерение сопротивления электрической изоляции обмоток. Известно, что электрическая изоляция обмоток электрической машины обладает гигроскопичностью (влагопоглощением), поэтому при продолжительном нахождении машины на складе либо другом

помещении в изоляцию обмоток проникает влага и ее электрическое сопротивление резко снижается. В связи с этим прежде чем включать двигатель в сеть, необходимо проверить электрическое сопротивление изоляции каждой обмотки относительно корпуса (земли) и сопротивление изоляции между обмотками.

Нормы сопротивления изоляции установлены либо в стандартах (ГОСТ), либо в технических условиях (ТУ) на конкретные типы электрических машин с обязательным указанием температуры, при которой должны проводиться измерения. В соответствии с правилами технической эксплуатации электроустановок (ПТЭ) при температуре изоляции, равной температуре окружающей среды, сопротивление изоляции обмоток низковольтных ($U_{\text{ном}} < 1000 \text{ В}$) машин переменного тока должно быть не менее 1 МОм, а машин постоянного тока — не менее 0,5 МОм.

Измерение сопротивления изоляции выполняют измерительным прибором — мегомметром, состоящим из магнитоэлектрического генератора постоянного тока и омметра. Сопротивление изоляции обмоток с номинальным напряжением до 660 В надлежит измерять мегомметром напряжением 500 В, а для обмоток с более высоким номинальным напряжением — мегомметром с напряжением 1000 В; при номинальном напряжении обмотки 3000 В и выше применяют мегомметры с напряжением 2500 В. Если обмотка соединена с корпусом через конденсатор, то обмотку следует отсоединить от конденсатора.

Во время проведения измерений стрелка прибора не сразу останавливается в определенном положении. Постепенный подход стрелки к уста-

новившемуся положению объясняется процессом поляризации, возникающим в изоляции, т. е. происходит как бы зарядка конденсатора, диэлектриком которого является изоляция обмотки. Продолжительность установления показаний прибора тем больше, чем меньше содержание влаги в изоляции. Это свойство положено в основу оценки степени увлажненности изоляции *методом абсорбции*. С этой целью результаты измерения сопротивления записывают дважды: через 15 с (сопротивление $R_{из15}$) и через 60 с (сопротивление $R_{из60}$) после начала измерения. Изоляция считается достаточно сухой, если при температуре от $+10$ до $+30^\circ\text{C}$ отношение сопротивлений $R_{из60}/R_{из15}$, называемое *коэффициентом абсорбции*, $k \geq 1,3$. При влажной изоляции указанные сопротивления мало различаются и k почти не отличается от единицы. Если в обмотку машины заложены датчики температуры, то следует также провести измерение изоляции и этих элементов. В этом случае все обмотки машины необходимо соединить с корпусом машины. Это измерение следует проводить прибором с напряжением не более 250 В.

В некоторых электрических машинах для предотвращения возникновения подшипниковых токов, ведущих к разрушению подшипников, применяют электрическую изоляцию последних, при этом один подшипник ос-

тавляют неизолированным для отвода в землю статических зарядов. В таких машинах следует также измерить сопротивление изоляции подшипников. При таком измерении необходимо ввести сухую изолирующую прокладку между валом и вкладышем неизолированного подшипника.

При выполнении измерений мегомметром с ручным приводом следует вращать рукоятку равномерно с частотой 120 об/мин. Приборы обычно снабжают центробежным ограничителем частоты вращения, которые при вращении более чем 120 об/мин разъединяют вал рукоятки от вала генератора. Продолжительность такого вращения составляет не менее одной минуты, а при использовании мегомметра на 2500 В и выше продолжительность вращения может составить не менее 3 мин. В этом случае целесообразно применение приборов с электроприводом генератора или с выпрямительным устройством вместо генератора.

Во время измерений происходит зарядка цепей аналогично зарядке конденсатора. Поэтому по окончании измерения провода обмоток следует соединить с заземленным корпусом машины. Во избежание искажений измерений поверхность мегомметра должна быть чистой и сухой. На рис. 21.1 показаны схемы подключения прибора к обмоткам статора трехфазного

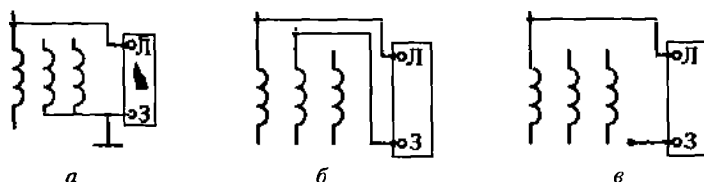


Рис. 21.1. Схемы включения мегомметра при измерениях сопротивления изоляции: а — между корпусом и других заземленных фаз; б — между фазами; в — между каждой фазой и корпусом

асинхронного двигателя. В начале измерений следует замкнуть клеммы прибора Л (линия) и З (земля). Если прибор настроен правильно, то его стрелка должна указывать на нуль. При размыкании этих клемм стрелка прибора должна указывать бесконечность.

5. Сушка электрической машины.

Увлажненность изоляции обмоток устраняют сушкой путем индукционного, токового или внешнего нагрева.

При *индукционном нагреве* вокруг корпуса машины наматывается кольцевая намагничивающая обмотка, подключаемая к источнику переменного тока (рис. 21.2, а). Переменное магнитное поле, создаваемое обмоткой, вызывает индукционный нагрев машины, что и способствует ее сушке. Для более качественной сушки целесообразно вынуть из машины ротор и сушить статор и ротор отдельно.

Более простым является *токовый метод* сушки, при котором по обмоткам пропускают постоянный или переменный ток, что вызывает нагрев обмоток и сушку их изоляции. Во избежание чрезмерного перегрева обмоток (машина неподвижна и вентиляция отсутствует) ток в обмотках не

должен превышать 40—60 % от номинального значения тока данной обмотки. Поэтому при токовом нагреве необходимо подводить напряжение к обмоткам через регулятор (рис. 21.2, б).

При *внешнем нагреве* горячий сухой воздух направляется на корпус электрической машины (рис. 21.2, в), который нагревается и равномерно передает теплоту всем обмоткам машины, вызывая сушку их изоляции. Внешний нагрев электрической машины можно выполнить посредством мощных электроламп.

В процессе сушки необходимо контролировать температуру нагрева обмоток, которая не должна превышать расчетную рабочую температуру нагрева обмоток в зависимости от класса нагревостойкости изоляции (см. табл. 2.12).

Возможен нагрев синхронных машин и машин постоянного тока при коротком замыкании обмоток и создании в них генераторного режима работы, вращая ротор (якорь) от приводного двигателя (рис. 21.3). В этом случае необходима регулировка тока в обмотке возбуждения и наличие комплекта измерительных приборов для контроля величины токов в обмотках.

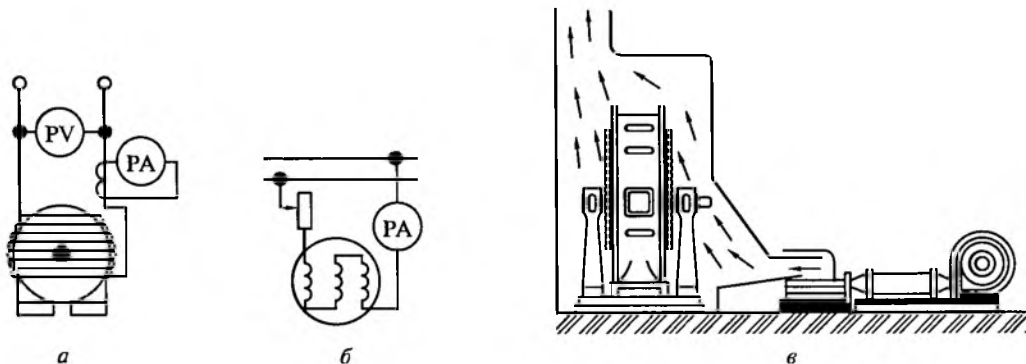


Рис. 21.2. Способы сушки обмоток электрических машин:

а — индукционный; б — токовый; в — внешним нагревом

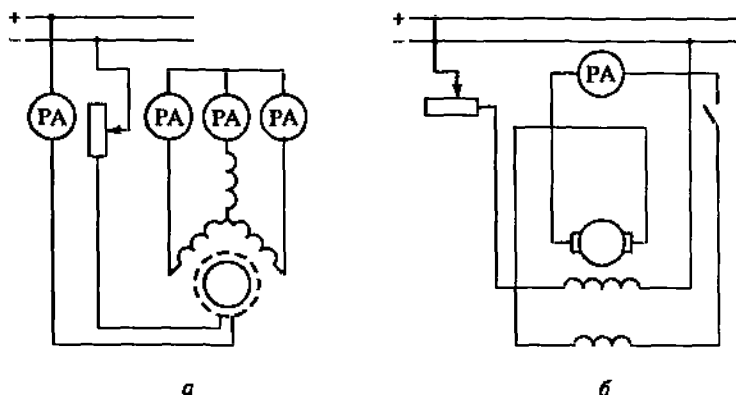


Рис 21.3 Схемы включения синхронной (а) и коллекторной машин постоянного тока (б) при генераторном режиме работы этих машин для сушки обмоток

В процессе сушки через каждые 1—2 ч измеряют сопротивление изоляции. В первые часы сушки это сопротивление может уменьшиться, что объясняется распариванием отсыревшей изоляции, но затем сопротивление изоляции увеличивается и достигает установившегося значения. Сушку считают законченной, когда сопротивление изоляции и коэффициент абсорбции в течение нескольких часов остаются неизменными. При мощности машин до 400 кВт коэффициент абсорбции можно не контролировать.

6. Пробный пуск двигателя. Соединяют обмотки двигателя требуемым образом и подключают к клеммам коробки выводов двигателя провода от автоматического выключателя (автомата). Проверяют наличие в схеме питания двигателя защитных устройств и их настройку на параметры двигателя. Если подшипники двигателя имеют устройства для пополнения смазки, то следует залить смазку. Исходя из мощностей питающей сети и двигателя принимают решение о необходимости применения специальных методов пуска (см. главы 4, 11 и 13).

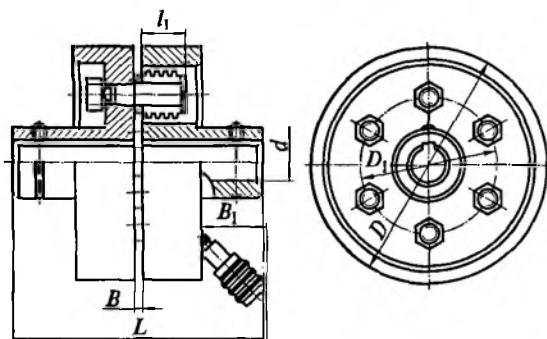
Двигатель включают в сеть временно (на 3—5 с), обратив внимание на направление вращения (соответствует ли оно указанному на двигателе), отсутствие посторонних шумов, состояние защитных устройств. Если никаких признаков неисправности не обнаружилось, то пуск в режиме холостого хода повторяют на более продолжительное время. При этом измеряют ток холостого хода двигателя, который не должен превышать указанный в документации на двигатель более чем на 10 %.

21.4. Монтаж и обслуживание электрических машин

Монтаж. Перед монтажом электрической машины необходимо выполнить работы, перечисленные в 21.3 (осмотр машины, устранение возможных неисправностей, проверка вращения «от руки», измерение электрического сопротивления изоляции обмоток с возможной их сушкой).

Машина, поступившая на место монтажа в собранном виде, устанавливается на металлической раме, ко-

Таблица 21.2. Муфты упругие втулочно-пальцевые



Типоразмер	Размеры, мм						n_{max} , об/мин	M , Н·м	Масса, кг	Момент инерции, кг·м ²
	d	D	L	B	B_1	l_1				
МУВП1-22	22	100	104	1-4	28	25	5600	54	2,14	0,002
МУВП1-28	28	120	125	1-5	42	32	4750	127	4,40	0,006
МУВП1-32	32	140	165	1-5	42	32	4000	235	7,33	0,014
МУВП1-38	38	140	165	1-5	42	32	4000	235	6,97	0,014
МУВП1-42	42	70	226	2-6	55	42	3350	440	13,27	0,039
МУВП1-45	45	170	226	2-6	55	42	3350	440	12,93	0,039
МУВП1-48	48	190	226	2-6	55	42	3000	685	18,04	0,064
МУВП1-55	55	190	226	2-6	55	42	3000	685	17,12	0,064
МУВП1-60	60	220	286	2-6	55	42	2650	1080	27,95	0,13
МУВП1-65	65	220	286	2-6	55	42	2650	1080	27,17	0,13
МУВП1-70	70	250	288	2-8	70	58	2240	1960	38,43	0,24
МУВП1-75	75	250	288	2-8	70	58	2240	1960	37,29	0,24
МУВП1-80	80	320	350	2-10	85	75	1700	3920	83,23	0,81
МУВП1-85	85	320	350	2-10	85	75	1700	3920	81,64	0,81
МУВП1-90	90	320	350	2-10	85	75	1700	3920	80,01	0,81
МУВП1-95	95	320	350	2-10	85	75	1700	3920	78,26	0,81
МУВП1-100	100	400	432	2-12	110	90	1400	7850	161,8	2,45
МУВП1-110	110	400	432	2-12	110	90	1400	7850	156,9	2,45
МУВП1-120	120	400	432	2-12	110	90	1400	7850	151,6	2,45
МУВП1-125	125	500	515	2-15	130	110	1120	11 000	272,9	6,75
МУВП1-130	130	500	515	2-15	130	110	1120	11 000	269,3	6,75
МУВП1-140	140	500	515	2-15	130	110	1120	11 000	291,0	7,10
МУВП1-150	150	500	515	2-15	130	110	1120	11 000	282,9	7,10

торая крепится на специальном фундаменте либо на том же основании, на котором расположена рабочая машина. Так как установочные размеры машины имеют допуски, при монтаже машины на металлической раме приходится пользоваться металлическими прокладками, которые следует заготовить заранее.

Обычно вал электрической машины (двигателя) соединяют с валом рабочей машины посредством муфты. Из большого конструктивного разнообразия соединительных муфт наибольшее применение получили упругие втулочно-пальцевые муфты типа МУВП. Передача вращательного движения от одной полумуфты к другой в этой муфте происходит через упругие резиновые втулки, надетые на пальцы (рис. в табл. 21.2). Эта муфта обладает компенсирующими свойствами: устраняет последствия небольшой несоосности сопрягаемых валов, возникшей при монтаже машины или в процессе эксплуатации.

Для соединения двух валов посредством муфты на концы этих валов напрессовывают полумуфты, предвари-

тельно проверив цилиндричность и соответствие наружных диаметров валов и внутренних диаметров полумуфт с помощью измерительных скоб и нутромеров. Посадка полумуфт на валы выполняется в горячем состоянии. Сочленяемые валы при установке полумуфт могут иметь радиальное или угловое смещение, что при работе двигателя приводит к значительным вибрациям и разрушению подшипников. Центровку валов выполняют посредством радиально-осевых скоб (рис. 21.4).

Контроль точности центровки осуществляется по величинам радиальных a и осевых b зазоров в четырех точках, равномерно расположенных по периметру муфты, т.е. при одновременном повороте двух валов через 90° . С этой целью на полумуфтах наносят риски. Разность зазоров a и b в диаметрально противоположных положениях валов должна быть меньше допустимых отклонений. Для упругой втулочно-пальцевой муфты наибольшее допустимое отклонение центровки вала в зависимости от частоты вращения составляет:

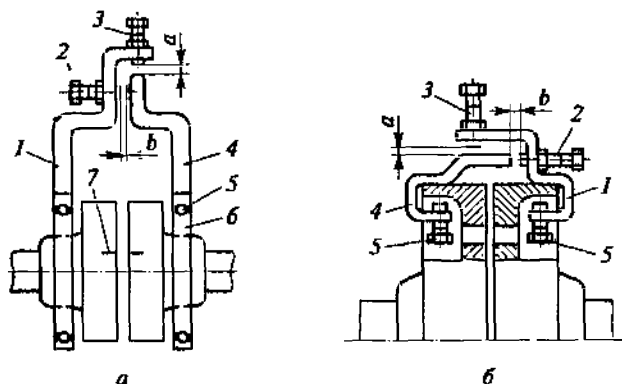


Рис. 21.4. Радиально-осевые скобы для центровки валов:

1, 4 — скобы; 2, 3 — болты для установки зазоров; 5 — болты для крепления скоб; 6 — хомут; 7 — риски (метки)

Частота вращения,
об/мин..... 3000 1500 750 500
Допустимое
отклонение, мм..... 0,20 0,30 0,40 0,50

После центровки валов затягивают болты крепления электрической машины к основанию, проверяют, не нарушилась ли при этом центровка валов и проверяют свободу вращения вала.

Обслуживание электродвигателей. В процессе эксплуатации электрической машины необходимо контролировать ее состояние.

1. Контроль за *температурой нагрева* электродвигателя состоит в периодическом измерении температуры отдельных его частей. Температура нагрева обмоток не должна превышать значений, допустимых для класса нагревостойкости изоляции, примененной в электродвигателе (см. 2 б). Большое значение при этом имеет отклонение напряжения питания от номинального значения. Работа электродвигателя с номинальной нагрузкой не допускается, если напряжение в сети снизилось более чем на 5 % или повысилось более чем на 10 % относительно номинального значения. Перегрузка электродвигателя сверхноминальной возможна, если в каталоге на данный электродвигатель имеется информация, что такая перегрузка допустима с указанием ее продолжительности. Нагрузка на электродвигатель должна быть снижена, если температура окружающей среды превысила допустимое значение (для машин общего назначения это 40 °С).

При измерении температуры могут применяться ртутные и спиртовые термометры, прикладываемые к наиболее доступным местам электродвигателя, возможен метод определения температуры измерением электричес-

кого сопротивления обмоток или же применением температурных датчиков, заложенных в обмотку или другие части электродвигателя.

2. *Подшипники качения*, применяемые обычно в электрических машинах мощностью до 500 кВт, в процессе работы машины также нагреваются. Предельно допустимая температура их нагрева 100 °С. Если подшипник нагревается свыше указанной температуры, то электродвигатель следует остановить, выяснить причину перегрева подшипника и устранить ее. При необходимости подшипник следует заменить.

Вид смазки подшипника и периодичность ее замены или пополнения должны соответствовать инструкции по эксплуатации данного электродвигателя. При пополнении или замене смазки подшипник следует внимательно осмотреть и в случае обнаружения его чрезмерного износа или повреждения заменить.

3. *Подшипники скольжения*, применяемые в электродвигателях мощностью 500 кВт и более, залиты баббитом, поэтому при длительной работе его температура не должна превышать 80 °С. В этих подшипниках возможно применение принудительной системы смазки: либо масло подается в подшипник под напором, либо оно подается на шейку вала посредством свободно вращающихся колец (одного или нескольких), нижняя часть которых помещена в ванну (картер) с постоянным объемом масла. Уровень масла в этой ванне должен поддерживаться на отметке указателя уровня, а если же отметка отсутствует, то уровень следует поддерживать на середине маслоуказательной стеклянной трубки. При завышенном уровне масла в подшипнике возникает опасность попа-

Таблица 21.3. Максимально допустимая мощность асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при его пуске прямым включением в сеть

Источник питания	Максимальная мощность электродвигателя
Трансформатор, питающий силовую сеть	20 % мощности трансформатора при частых пусках, 30 % — при редких
Трансформатор, питающий силовую и осветительную сети	4 % мощности трансформатора при частых пусках, 8 % — при редких
Электростанция малой мощности	12 % мощности электростанции
Блок «трансформатор—двигатель»	До 80 % мощности трансформатора
Высоковольтная сеть	Не более 3 % мощности трехфазного короткого замыкания в точке присоединения электродвигателя

дания масла на обмотку машины, что может привести к повреждению изоляции обмотки и выходу двигателя из строя.

При нормальной работе подшипника доливку масла делают обычно один раз в месяц, а замену — не реже одного раза в год.

Признаком недостаточного уровня масла в ванне подшипника скольжения является чрезмерно быстрое вращение колец, сопровождаемое легким позваниванием.

4. *Коллектор и щетки* в электродвигателях постоянного тока нуждаются в контроле их состояния. При работе электродвигателя с номинальной нагрузкой на коллекторе не должно превышать допустимую степень искрения (см. табл. 13.1).

Причины, вызывающие искрение на коллекторе, весьма разнообразны, поэтому если искрение выходит за пределы допустимого, следует руководствоваться указаниями, изложенными в 13.3. Необходимо следить, чтобы щетки равномерно перекрывали поверхность коллектора, что способствует равномерному износу коллектора. Поверхность щеток должна быть блестящей и всей поверхностью прилегать к коллектору. Сколы щеток не-

допустимы. Все пластины коллектора должны иметь одинаковый цвет. Если же некоторые пластины имеют более светлый оттенок, то это свидетельствует об их более интенсивном износе.

5. Необходимо, чтобы при пуске трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором прямым включением в сеть падение напряжения в питающей сети не превышало допустимых значений. С этой целью при определении максимально допустимой мощности двигателя целесообразно воспользоваться данными табл. 21.3.

21.5. Основные виды неисправностей и отказов электрических машин, их причины и способы устранения

Электрические машины, изготовленные на заводе и прошедшие весь комплекс приемосдаточных испытаний, исправны и по своим характеристикам соответствуют паспортным данным. Большинство отказов происходят по причинам, возникающим в процессах, следующих за выпуском готовой машины: погрузка, транспорти-

Таблица 21.4. Часто встречающиеся неисправности электрических машин

Виды неисправностей	Причина	Способ устранения
При включении в сеть ротор (якорь) неподвижен	На входных клеммах машины отсутствует напряжение либо оно слишком мало	Проверить питающую линию, устранить повреждение и обеспечить подачу номинального напряжения
При включении в сеть ротор неподвижен, сильное гудение, интенсивное нагревание	Разрушен подшипник; задевание ротора о статор; заклинило вал рабочего механизма	Отсоединить вал двигателя от вала механизма и вновь включить двигатель; если вал двигателя останется неподвижным, снять двигатель и отправить в ремонт
Остановка работающего двигателя	Прекращена подача напряжения Сработала защита двигателя	Найти и устранить разрыв в питающей цепи Выяснить причину срабатывания защиты (перегрузка двигателя, значительно изменилось напряжение в сети), устранить ее и включить двигатель
Двигатель не достигает требуемой частоты вращения, сильно перегревается	Двигатель перегружен Подшипник вышел из строя	Устранить перегрузку Заменить подшипник
Двигатель сильно перегревается	Двигатель перегружен Повышено или понижено напряжение сети Повышена температура окружающей среды Нарушена вентиляция двигателя (засорились каналы подачи воздуха на вентилятор, загрязнена поверхность двигателя)	Устранить перегрузку Выяснить и устранить причину отклонения напряжения от номинального Устранить причину и понизить температуру до допустимого значения Очистить вентиляционные каналы подачи воздуха на вентилятор и устранить загрязнение поверхности двигателя
Работа двигателя сопровождается сильным гудением, появился дым	Произошло замыкание витков некоторых катушек обмотки статора короткое замыкание одной фазы	Двигатель отправить в ремонт
Сильная вибрация двигателя	Нарушилась балансировка вентиляторного колеса двигателя либо другого элемента, установленного на валу двигателя	Устранить небаланс вентилятора либо другого элемента, установленного на валу двигателя

Окончание табл. 21.4

Виды неисправностей	Причина	Способ устранения
Подшипник перегревается, в нем слышны шумы	Подшипник и смазка в нем загрязнены Подшипник изношен Нарушена центровка валов двигателя и рабочей машины	Удалить из подшипника смазку, промыть его и заложить новую смазку Заменить подшипник Произвести центровку валов
Двигатель не отключается от сети при нажатии кнопки «Стоп»	«Залипли» контакты магнитного пускателя	Отключить двигатель автоматическим выключателем и заменить магнитный пускатель
При включении в сеть двигатель работает неустойчиво	Силовые контакты магнитного пускателя не создают устойчивого соединения	Заменить магнитный пускатель
Разрушение лап машины в местах их присоединения к корпусу	Очень сильная вибрация машины Нарушение соосности сочлененных валов двигателя и рабочей машины	Определить несбалансированные вращающиеся элементы и выполнить их балансировку Разъединить валы и восстановить их соосность
Разрушение гнезд с резьбой в корпусе для крепления подшипниковых щитов	Слишком сильная вибрация Разрушен подшипник	Устранить причины, вызывающие такую вибрацию Заменить подшипник
Ослабление крепления подшипника в подшипниковом щите	Слишком большая радиальная нагрузка на выходной конец вала, приведшая к износу места посадки подшипника в щите Очень большая вибрация машины	Уменьшить радиальную нагрузку и заменить двигатель; применить двигатель другого типоразмера, способный без разрушения выдержать существующую радиальную нагрузку Устранить причины сильной вибрации и заменить двигатель

ровка, разгрузка, хранение, монтаж на месте эксплуатации. В этот период электрические машины подвержены резким толчкам, ударам, вибрациям, по своим воздействиям часто выходящими за пределы допустимых. В процессе хранения машины подвержены воздействию низких температур и влаги, тем более что часто машины хра-

нятся в сырых помещениях и даже на открытых площадках. В результате описанных воздействий неисправности возникают обычно в период приработки машины (см. рис. 2.12) или даже при первом ее пуске. Например, во время хранения машины под воздействием повышенной влажности внутренняя поверхность сердечника статор-

ра и наружная поверхность ротора покрываются слоем ржавчины, заполняющей воздушный зазор между статором и ротором. При первом же включении двигателя ротор оказывается неподвижным. Это ведет к необходимости разборки двигателя и тщательной очистке заржавевших поверхностей. Частицы ржавчины попадают в обмотку двигателя и оказывают разрушительное воздействие на ее изоляцию.

Следует иметь в виду, что неисправности электрических машин, связанные с повреждением изоляции, наиболее нежелательны, так как они ведут к необходимости перемотки машины, а следовательно, требуют ее капитального ремонта. Часто нарушения витковой изоляции становятся причиной местных коротких замыканий. При этом машина перегревается, вращение ротора становится неравномерным, возникает небаланс сил тяжения ротора к статору, приводящий к деформации вала машины. Причины, способные вызвать межвитковые короткие замыкания, возникают и при эксплуатации машины, когда во внутреннюю полость попадают посторонние частицы (пыль, грязь, мелкая металлическая стружка), способные механически повредить изоляцию обмотки.

При работе асинхронных двигателей от преобразователей частоты ПЧ, в которых выходное трехфазное напряжение формируется методом широтно-импульсной модуляции, на входе двигателя возникает напряжение импульсной формы, амплитуда которого может значительно превышать амплитуду синусоидального напряжения первой (основной) гармоники. Это может привести к нарушению межвитковой или межфазовой изоляции и вызвать межвитковые короткие замы-

кания. Устранению этого нежелательного явления способствует применение сглаживающих фильтров на выходе преобразователя в цепях питания двигателей.

В коллекторных двигателях постоянного тока причинами неисправностей часто являются нарушения работы щеточно-коллекторного узла, способные вызвать усиление искрения или даже круговой огонь на коллекторе.

Возможные неисправности электрических машин настолько разнообразны и многочисленны, что описать их полностью не представляется возможным.

В табл. 21.4 приведены наиболее характерные и часто встречающиеся неисправности в электрических машинах, причины, их вызвавшие, и способы устранения этих неисправностей.

21.6. Энергосбережение

Энергосбережение — это комплекс правовых, технических и экономических мер, направленных на эффективное использование энергетических ресурсов. В соответствии с Федеральным законом РФ «Об энергосбережении» на промышленном предприятии должны быть разработаны мероприятия по экономии электроэнергии применительно к каждой электроустановке. В первую очередь это относится к электромеханическим устройствам с электрическим приводом, основной элемент которого электродвигатель. Известно, что более половины всей производимой в мире электроэнергии потребляется электродвигателями в электроприводах рабочих машин, механизмов, транспортных средств. Поэтому меры по экономии электроэнергии в электроприводах наиболее актуальны.

Основные положения энергосбережения регламентированы государственными стандартами РФ:

ГОСТ Р 51379—99. Энергосбережение. Энергетический паспорт промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов.

ГОСТ Р 51380—99. Энергосбережение. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции их нормативным значениям. Общие требования.

ГОСТ Р 51387—99. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение.

ГОСТ Р 51541—99. Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей.

Задачи энергосбережения требуют оптимального решения не только в процессе эксплуатации электрических машин, но и при их проектировании.

В процессе эксплуатации двигателя значительные потери энергии наблюдаются в *переходных режимах* и в первую очередь при его пуске.

Потери энергии в переходных режимах могут быть заметно снижены за счет применения двигателей с меньшими значениями моментов инерции ротора, что достигается уменьшением диаметра ротора при одновременном увеличении его длины, так как мощность двигателя при этом должна оставаться неизменной. Например, так

сделано в двигателях краново-металлургических серий, предназначенных для работы в повторно-кратковременном режиме (см. 7.1, 7.2 и 15.1), с большим числом включений в час.

Эффективным средством снижения потерь *при пуске* двигателей является пуск при постепенном повышении напряжения, подводимого к обмотке статора. Для пояснения обратимся к рис. 21.5, *а*, где показан график зависимости мощности P_n , затрачиваемой при пуске двигателя в функции времени $P_n = f(t)$. При пуске двигателя без нагрузки ($M_c = 0$) с некоторым допущением можно принять этот график прямолинейным. Площадь прямоугольника $0abc$ эквивалентна количеству энергии A_n , затраченной при пуске двигателя, площадь треугольника $0bc$ эквивалентна полезно затраченной энергии на разгон электропривода до установившейся скорости за время пуска t_n , а площадь треугольника $0ab$ эквивалентна потерям энергии при пуске. Если же пуск этого двигателя провести в два этапа: сначала подвести к двигателю напряжение, равное $0,5U_{ном}$, а спустя время $0,5t_n$, когда частота вращения ротора достигнет значения, равного половине установившейся частоты вращения, повысить напряжение до $U_{ном}$, то график $P = f(t)$ приобретет вид рис. 21.5, *б*. В этом слу-

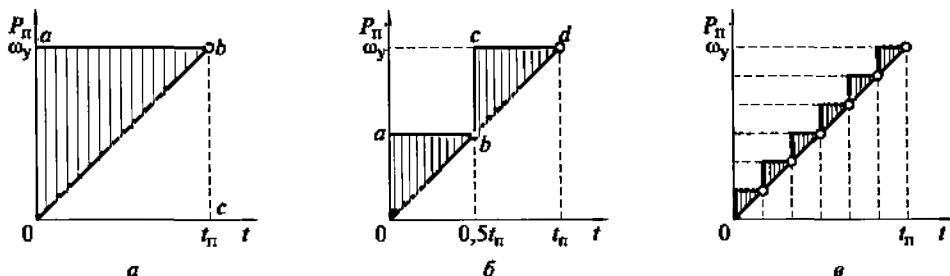


Рис. 21.5. Графики потерь энергии при разных способах пуска:

а — одноэтапный; *б* — двухэтапный; *в* — многоэтапный

чае потери при пуске эквивалентны сумме площадей треугольников $0ab$ и bcd . Таким образом, энергия потерь при пуске в два этапа уменьшилась в два раза по сравнению с одноэтапным пуском. Полезно затраченная энергия в обоих случаях одинакова.

Если же увеличить число этапов при пуске, т.е. выполнить пуск многоступенчато, то потери энергии будут эквивалентны сумме площадей всех небольших треугольников (рис. 21.5, в). Потери энергии при этом станут еще меньше. В общем случае потери энергии при многоступенчатом пуске уменьшаются обратно пропорционально числу ступеней. Если же пуск двигателя проводить постепенно, плавно повышая подводимое к двигателю напряжение, то эффект энергосбережения при пуске окажется еще большим.

Такой энергосберегающий способ пуска двигателя возможен только при работе двигателя в системе с регулируемым преобразователем: для асинхронных двигателей это устройства плавного пуска (см. 8.2.1) или преобразователи частоты (см. 8.2.2), а для двигателей постоянного тока это электронные (тиристорные) устройства управления (см. 16.2).

Энергия, расходуемая при торможении двигателя, равна кинетической энергии, запасенной в движущихся частях электропривода при его пуске. Энергосберегающий эффект при торможении зависит от способа торможения. Наибольший энергосберегающий эффект происходит при генераторном рекуперативном торможении с отдачей энергии в сеть (см. 13.5 и 13.6). При динамическом торможении двигатель отключается от сети, запасенная энергия рассеивается в двигателе и расхода энергии из сети не происходит. Наибольшие потери энергии наблюдаются

при торможении противовключением, когда расход электроэнергии равен трехкратному значению энергии, рассеиваемой в двигателе при динамическом торможении.

При установившемся режиме работы двигателя с номинальной нагрузкой потери энергии определяются номинальным значением КПД. Но если электропривод работает с переменной нагрузкой, то в периоды спада нагрузки КПД двигателя понижается, что ведет к росту потерь. Эффективным средством энергосбережения в этом случае является снижение напряжения, подводимого к двигателю в периоды его работы с недогрузкой. Этот способ энергосбережения возможно реализовать при работе двигателя в системе с регулируемым преобразователем при наличии в нем обратной связи по току нагрузки. Сигнал обратной связи по току корректирует сигнал управления преобразователем, вызывая уменьшение напряжения, подводимого к двигателю в периоды снижения нагрузки. Если же приводным является асинхронный двигатель, работающий при соединении обмоток статора «треугольником», то снижение подводимого к фазным обмоткам напряжения можно легко реализовать путем переключения этих обмоток на соединение «звездой», так как в этом случае фазное напряжение понижается в 1,73 раза. Этот метод целесообразен еще и потому, что при таком переключении повышается коэффициент мощности двигателя $\cos \varphi_1$, что также способствует энергосбережению. На рис. 4.7 представлены графики $\cos \varphi_1 = f(P)$, из которых следует, что при переключении обмоток с «треугольника» на «звезду» при снижении нагрузки до 50 % относительно номинальной коэффициент мощности

возрастает более чем на 20 %. Примером практического применения этого способа энергосбережения может служить электропривод с асинхронным двигателем, работающий в условиях значительных колебаний нагрузки.

Схема, приведенная на рис. 21.6, позволяет с помощью двух реле тока КА1 и КА2, катушки которых включены последовательно в фазные обмотки статора через измерительные трансформаторы тока ТА1 и ТА2, автоматизировать переключение обмотки статора с «треугольника» на «звезду» при снижении нагрузки двигателя на 40—50 % относительно номинальной и обратное переключение при восстановлении нагрузки.

При нажатии кнопки SB1 «Пуск» включается силовой контактор KM1, линейные контакты которого подключают двигатель к сети. Контактор KM2 в начальный момент пуска остается не включенным и своими размыкающимися контактами соединяет обмотку статора «звездой». Но как только начинается пуск двигателя, значительный пусковой ток статора вызывает срабатывание реле тока КА2. При этом контактор KM2 своими замыкающими контактами переключает обмотку статора «треугольником».

Реле тока КА1 срабатывает, и двигатель переходит в рабочий режим.

Если нагрузка двигателя снизится до значения $P_2 < 0,5P_{\text{ном}}$, то реле тока КА1 отпустит и своими контактами отключит

контактор KM2, что приведет к пересоединению обмотки статора с «треугольника» на «звезду». При этом двигатель будет продолжать работу при повышенном значении коэффициента мощности. Если же нагрузка двигателя вновь возрастет до значения $P_2 > 0,5P_{\text{ном}}$, то произойдет переключение обмотки статора со «звезды» на «треугольник».

При проектировании электропривода важным является правильный выбор мощности двигателя. Так, выбор двигателя *завышенной* номинальной мощности ведет к снижению его технико-экономических показателей (КПД и коэффициента мощности), вызванных недогрузкой двигателя. Такое решение при выборе двигателя ведет как к росту капитальных вложений (с ростом мощности увеличивается стоимость двигателя), так и эксплуатационных расходов, поскольку с уменьшением КПД и коэффициента мощности растут потери, а следовательно, растет непроизводительный расход электроэнергии.

Применение двигателей *заниженной* номинальной мощности вызывает их перегрузку при эксплуатации. Вследствие этого растет температура перегрева обмоток, что способствует росту потерь и вызывает сокращение срока службы двигателя. В конечном счете

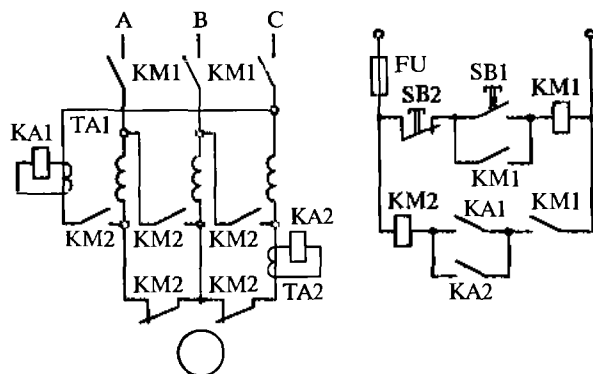


Рис. 21.6. Схема автоматического переключения обмотки статора асинхронного двигателя с «треугольника» на «звезду»

возникают аварии и непредвиденные остановки электропривода и, следовательно, растут эксплуатационные расходы. В наибольшей степени это относится к двигателям постоянного тока из-за наличия у них щеточно-коллекторного узла, чувствительного к перегрузке.

Большое значение имеет рациональный выбор пускорегулирующей аппаратуры. С одной стороны, желательно, чтобы процессы пуска, торможения реверса и регулирования частоты вращения не сопровождалось значительными потерями электроэнергии, так как это ведет к удорожанию эксплуатации электропривода. Но, с другой стороны, желательно, чтобы стоимость пускорегулирующих устройств не была бы чрезвычайно высокой, что привело бы к росту капитальных вложений. Обычно эти требования находятся в противоречии. Например, применение тиристорных пускорегулирующих устройств обеспечивает наиболее экономичное протекание процессов пуска и регулирования двигателя, но стоимость этих устройств пока еще остается достаточно высокой. Поэтому при решении вопроса целесообразности применения тиристорных устройств следует обратиться к графику работы проектируемого электропривода. Если электропривод не подвержен значительным регулировкам частоты вращения, частым пускам, реверсам и т. п., то повышенные затраты на тиристорное либо другое дорогостоящее оборудование могут оказаться неоправданными, а расходы, связанные с потерями энергии, — незначительными. И наоборот, при интенсивной эксплуатации электропривода в переходных режимах применение электронных пускорегулирующих устройств становится целесооб-

разным. К тому же следует иметь в виду, что эти устройства практически не нуждаются в уходе и их технико-экономические показатели, включая надежность, достаточно высоки. Необходимо, чтобы решение по применению дорогостоящих устройств электропривода подтверждалось технико-экономическими расчетами.

Известно, что электрические потери в питающих сетях и обмотках электрических машин пропорциональны квадрату тока ($P_{эл} = I^2 R$). По этой причине желательно электропитание двигателей от сети с более высоким напряжением, так как при заданной мощности применение более высокого напряжения сопровождается уменьшением силы тока и, следовательно, сокращением потерь. Поэтому для низковольтных двигателей целесообразно применение напряжения 440 В (для двигателей постоянного тока) или 660 В (для двигателей переменного тока). Что же касается двигателей мощностью 500 кВт и более, то они обычно рассчитаны на напряжение 6000 или 10 000 В.

Решению проблемы энергосбережения способствует применение синхронных двигателей, создающих в питающей сети реактивные токи, опережающие по фазе напряжение (см. 11.2). В итоге сеть разгружается от реактивной (индуктивной) составляющей тока, повышается коэффициент мощности на данном участке сети, что ведет к уменьшению тока в этой сети и, как следствие, к энергосбережению. Эти же цели преследует включение в сеть синхронных компенсаторов (см. 11.3).

Примером целесообразного применения синхронных двигателей является электропривод компрессорных установок, снабжающих предприятие сжатым воздухом. Для этого электропри-

Таблица 21.5. Комплектные конденсаторные установки серии УКМ 58

Типоразмер	Напряжение $U_{ном}$, кВ	Номинальная реактивная мощность, квар	Масса, кг
УКМ 58-04-20-10 УЗ	0,4	20	47
УКМ 58-04-30-10 УЗ	0,4	30	62
УКМ 58-04-50-25 УЗ	0,4	50	70
УКМ 58-04-67-33,3 УЗ	0,4	67	85
УКМ 58-04-100-33,3 УЗ	0,4	100	110
УКМ 58-04-150-30 УЗ	0,4	150	132
УКМ 58-04-180-30 УЗ	0,4	180	145
УКМ 58-04-200-33,3 УЗ	0,4	200	168
УКМ 58-04-300-33,3 УЗ	0,4	300	210
УКМ 58-04-402-67 УЗ	0,4	402	395
УКМ 58-04-603-67 УЗ	0,4	603	585

Примечание. В обозначении УКМ 58 вторая цифра обозначает номинальное напряжение, кВ, третья — реактивную мощность, квар, четвертая — мощность одной ступени, квар.

вода характерен пуск при небольшой нагрузке на валу, продолжительный режим работы при стабильной нагрузке, отсутствие торможений и реверсов. Такой режим работы вполне соответствует свойствам синхронных двигателей. Используя в синхронном двигателе режим перевозбуждения, можно достичь значительного энергосбережения в масштабе всего предприятия.

С аналогичной целью применяют силовые конденсаторные установки («косинусные» конденсаторы). Создавая в сети ток, опережающий по фазе напряжение, эти установки частично компенсируют индуктивные (отстаю-

щие по фазе) токи, что ведет к повышению коэффициента мощности сети, а следовательно, к энергосбережению. Наиболее эффективным является применение конденсаторных установок типа УКМ 58 с автоматическим поддержанием заданного значения коэффициента мощности и со ступенчатым изменением реактивной мощности в диапазоне от 20 до 603 квар при напряжении 400 В (табл. 21.5).

Необходимо помнить, что энергосбережение направлено на решение не только экономических, но и экологических проблем, связанных с производством электроэнергии.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-------------------	---

Раздел I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Глава 1. Назначение, классификация и основные требования к электрическим машинам	5
1.1. Назначение и принцип действия электрических машин	5
1.2. Классификация электрических машин	8
1.3. Преобразование энергий в электрических машинах	9
1.4. Техничко-экономические требования к электрическим машинам	12
1.5. Характеристики электрических машин. Понятие об устойчивой работе электрических машин	13
Глава 2. Стандартизация основных параметров и качество электрических машин	18
2.1. Номинальные данные электрических машин	18
2.2. Стандартизация основных параметров электрических машин	19
2.3. Нагревание электрических машин	22
2.4. Способы охлаждения электрических машин	26
2.5. Конструктивные формы исполнения электрических машин	30
2.6. Материалы, применяемые в электрических машинах	40
2.7. Режимы работы электрических машин	46
2.8. Качество и надежность электрических машин	49
2.9. Вибрации в электрических машинах	52
2.10. Шумы в электрических машинах	54
2.11. Серии электрических машин	55

Раздел II. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Глава 3. Принцип действия и устройство трехфазных асинхронных двигателей	58
3.1. Принцип действия асинхронного двигателя	58
3.2. Активная часть асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	60
3.3. Конструкция трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	66
3.4. Конструкция трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором	69
Глава 4. Свойства трехфазных асинхронных двигателей	70
4.1. Основные уравнения и электрическая схема замещения асинхронного двигателя	70
4.2. Потери и КПД асинхронной машины	71
4.3. Электромагнитный момент асинхронной машины	73
4.4. Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя	75

4.5. Влияние напряжения сети и активного сопротивления обмотки ротора на механическую характеристику асинхронного двигателя	77
4.6. Рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей	78
4.7. Пусковые свойства трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором	80
4.8. Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором	86
4.9. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с фазным ротором	90
4.10. Регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором изменением числа полюсов в обмотке статора	91
4.11. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей изменением частоты питающего напряжения	92
4.12. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей изменением подводимого напряжения	95
4.13. Импульсное регулирование частоты вращения асинхронных двигателей	98
4.14. Асинхронные двигатели в тормозных режимах	99
4.15. Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели	104
4.15.1. Принцип работы однофазного асинхронного двигателя	104
4.15.2. Конденсаторные асинхронные двигатели	108
4.15.3. Включение трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть	110
Глава 5. Асинхронные машины нетрадиционной конструкции	111
5.1. Индукционный регулятор напряжения и фазорегулятор	111
5.2. Однофазный асинхронный двигатель с экранированными полюсами	113
5.3. Линейные асинхронные двигатели	114
Глава 6. Серии асинхронных двигателей общего назначения	116
6.1. Асинхронные двигатели серии 4А	116
6.2. Трехфазные асинхронные двигатели серии АИ	126
6.3. Двигатели трехфазные асинхронные серии АОЗ	133
6.4. Двигатели трехфазные асинхронные серии 5А	136
6.5. Серия трехфазных асинхронных двигателей общего назначения ВЭМЗ	139
6.6. Двигатели однофазные асинхронные	160
6.7. Трехфазные асинхронные двигатели большой мощности высоковольтные	168
6.7.1. Трехфазные асинхронные двигатели серии А4	168
6.7.2. Трехфазные асинхронные двигатели серии ДАЗ04	169
Глава 7. Асинхронные двигатели специального назначения	175
7.1. Двигатели трехфазные асинхронные краново-металлургические серий МТФ, МТКФ, МТН и МТКН	175
7.2. Двигатели трехфазные асинхронные крановые серий 4МТ	190
7.3. Серия двигателей для привода лифтов	195
7.4. Взрывозащищенные двигатели	198
7.4.1. Основные понятия о взрывозащите электрооборудования	198
7.4.2. Выбор электрических машин для взрывоопасных зон	202
7.4.3. Двигатели асинхронные взрывозащищенные серии АИМР	203
7.4.4. Двигатели асинхронные взрывозащищенные серии ВА	205

7.4.5. Двигатели асинхронные взрывозащищенные рудничные серии ВПР	207
7.4.6. Двигатели асинхронные взрывозащищенные серии ВАО	210
7.5. Двигатели асинхронные погружные серий ПЭД, ПЭДВ, ПЭДП, ПЭДУ-103	210
Глава 8. Управление асинхронными двигателями	214
8.1. Типовые схемы автоматического управления трехфазными асинхронными двигателями	214
8.1.1. Схема управления пуском трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором посредством неререверсивного линейного контактора	215
8.1.2. Схема пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»	216
8.1.3. Схема неререверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с динамическим торможением	217
8.1.4. Схема реверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с применением торможения противовключением в функции скорости	217
8.1.5. Схема неререверсивного управления двухскоростным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором и двумя обмотками на статоре с разным числом полюсов	219
8.1.6. Схема неререверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором	220
8.2. Электронные устройства для управления трехфазными асинхронными двигателями	222
8.2.1. Тиристорные устройства плавного пуска трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором	222
8.2.2. Преобразователи частоты для управления асинхронными двигателями	225
Раздел III. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ	
Глава 9. Синхронные генераторы	229
9.1. Принцип действия синхронного генератора	229
9.2. Способы возбуждения синхронных машин	231
9.3. Типы синхронных машин и их конструктивные особенности	233
9.4. Охлаждение крупных синхронных машин	240
9.5. Основные уравнения и характеристики синхронных генераторов	241
Глава 10. Серии синхронных генераторов	248
10.1. Синхронные явнополюсные генераторы серий СГД2, СГД2М	248
10.2. Синхронные явнополюсные генераторы серий ЕСС и ЕСС5	249
10.3. Гидрогенераторы серии СВ	251
10.4. Гидрогенератор-двигатель типа ВГДС1025/245—40УХЛ4	252
10.5. Турбогенераторы серий Т, ТВФ и ТВВ	253
Глава 11. Синхронные двигатели и компенсаторы	255
11.1. Принцип работы и пуск синхронного двигателя	255
11.2. Характеристики синхронных двигателей	258
11.3. Назначение и принцип работы синхронных компенсаторов	260
11.4. Синхронные явнополюсные двигатели серии СД2	262

11.5. Синхронные двигатели серий СДН, СДНЗ, СДСЗ	266
11.6. Синхронные явнополюсные двигатели серии СДКП2	267
11.7. Синхронные турбодвигатели серии СДТ	268
11.8. Синхронные компенсаторы серий КС и КСВ	269
11.9. Возбудители тиристорные для синхронных машин	270
Глава 12. Синхронные машины нетрадиционной конструкции	272
12.1. Индукторные синхронные машины	272
12.2. Синхронные генераторы с когтеобразными полюсами	274
12.3. Синхронные машины с постоянными магнитами	275
12.4. Синхронные реактивные двигатели	278
12.5. Гистерезисные двигатели	279
12.6. Волновые двигатели	282
 Раздел IV. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА	
Глава 13. Устройство и основные свойства генераторов и двигателей постоянного тока	285
13.1. Устройство коллекторных машин постоянного тока	285
13.2. Обмотки якорей машин постоянного тока	288
13.3. Причины искрения на коллекторе машины постоянного тока и способы улучшения коммутации	292
13.4. Генераторы постоянного тока	295
13.5. Двигатель постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения	297
13.6. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения	302
13.7. Двигатель постоянного тока смешанного возбуждения	305
13.8. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока	306
13.9. Универсальные коллекторные двигатели	310
13.10. Машины постоянного тока нетрадиционной конструкции	312
13.10.1. Машины постоянного тока с постоянными магнитами	312
13.10.2. Вентильный двигатель постоянного тока	313
Глава 14. Серии электрических машин постоянного тока общего назначения	317
14.1. Машины постоянного тока серии 2П	317
14.1.1. Двигатели постоянного тока серии 2П	318
14.1.2. Генераторы постоянного тока серии 2П	336
14.2. Двигатели постоянного тока серии 4П	336
14.3. Универсальные коллекторные двигатели серии УВ	346
Глава 15. Серии двигателей постоянного тока специального назначения	346
15.1. Двигатели постоянного тока металлургические и крановые серии Д	346
15.2. Двигатели постоянного тока главного привода прокатных станов серии МП	357
15.3. Вентильные двигатели серии ЗДВУ	360
Глава 16. Управление двигателями постоянного тока	362
16.1. Типовые схемы автоматического управления двигателями постоянного тока	362
16.1.1. Схема неререверсивного управления пуском в функции времени и динамическим торможением двигателя постоянного тока параллельного возбуждения	362
16.1.2. Схема управления пуском двигателя постоянного тока в функции времени, реверсом и торможением противовключением в функции ЭДС	364

16.2. Электронные устройства для управления двигателями постоянного тока	366
---	-----

Раздел V. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПРИБОРНЫХ УСТРОЙСТВ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Глава 17. Исполнительные двигатели	369
17.1. Назначение исполнительных двигателей и предъявляемые к ним требования	369
17.2. Исполнительные двигатели постоянного тока	370
17.3. Конструкция исполнительных двигателей постоянного тока	372
17.3.1. Исполнительные коллекторные двигатели постоянного тока с полым малоинерционным якорем типов ДП35, ДП40, ДП50 и ДП60	376
17.3.2. Исполнительные коллекторные двигатели с гладким якорем типов ДП20, ДП25, ДП32 и ДП40	377
17.3.3. Вентильные двигатели серии ВК	379
17.3.4. Универсальные коллекторные исполнительные моментные двигатели серии УВ габарита 06	379
17.3.5. Высокомоментные двигатели постоянного тока	380
17.3.6. Коллекторные двигатели постоянного тока, применяемые в качестве силовых двигателей для привода различных механизмов и устройств	381
17.4. Исполнительные асинхронные двигатели	383
17.5. Конструкция исполнительных асинхронных двигателей	384
17.5.1. Исполнительные асинхронные двигатели, выпускаемые промышленностью	386
17.6. Синхронные двигатели для привода механизмов приборных устройств	387
17.7. Исполнительные шаговые двигатели	389
17.8. Гироскопические двигатели	395
17.9. Электродвигатели привода считывающих устройств	397
17.9.1. Лентопротяжные механизмы	398
17.9.2. Электропривод устройств считывания информации с оптических дисков	400
Глава 18. Информационные электрические машины	403
18.1. Тахогенераторы постоянного тока	403
18.2. Асинхронные тахогенераторы	406
18.3. Сельсины	407
18.4. Вращающиеся трансформаторы	411
Глава 19. Электромашинные усилители	420
19.1. Принцип действия электромашинного усилителя	420
19.2. Электромашинные усилители серии ЭМУ	424

Раздел VI. ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Глава 20. Выбор двигателей для электропривода	426
20.1. Выбор двигателей по роду тока и принципу действия, конструктивному исполнению и внешним воздействиям	426
20.2. Определение расчетной мощности и выбор двигателя	428

20.2.1. Расчет мощности двигателя для продолжительного режима	430
20.2.2. Расчет мощности двигателя для кратковременного режима	435
20.2.3. Расчет мощности двигателей при повторно-кратковременном режиме работы	436
20.3. Проверка двигателей на достаточность пускового момента и перегрузочную способность	439
Глава 21. Техническое обслуживание электрических машин	440
21.1. Основные понятия и определения	440
21.2. Виды износа электрических машин	441
21.3. Подготовка и пробный пуск электродвигателя	442
21.4. Монтаж и обслуживание электрических машин	447
21.5. Основные виды неисправностей и отказов электрических машин, их причины и способы устранения	451
21.6. Энергосбережение	454
Глава 22. Техника безопасности при техническом обслуживании электроустановок	459
22.1. Основные понятия и определения	459
22.2. Средства обеспечения электробезопасности	461
22.3. Основные технические и организационные мероприятия по безопасному проведению работ в действующих электроустановках	464
22.3.1. Виды работ в действующих электроустановках	464
22.3.2. Правила оформления работ в электроустановках	465
Основные буквенные обозначения параметров и размеров	466
Литература	470
Предметный указатель	471
Указатель серий и типов электрических машин и устройств управления	473