

СРЕДНЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

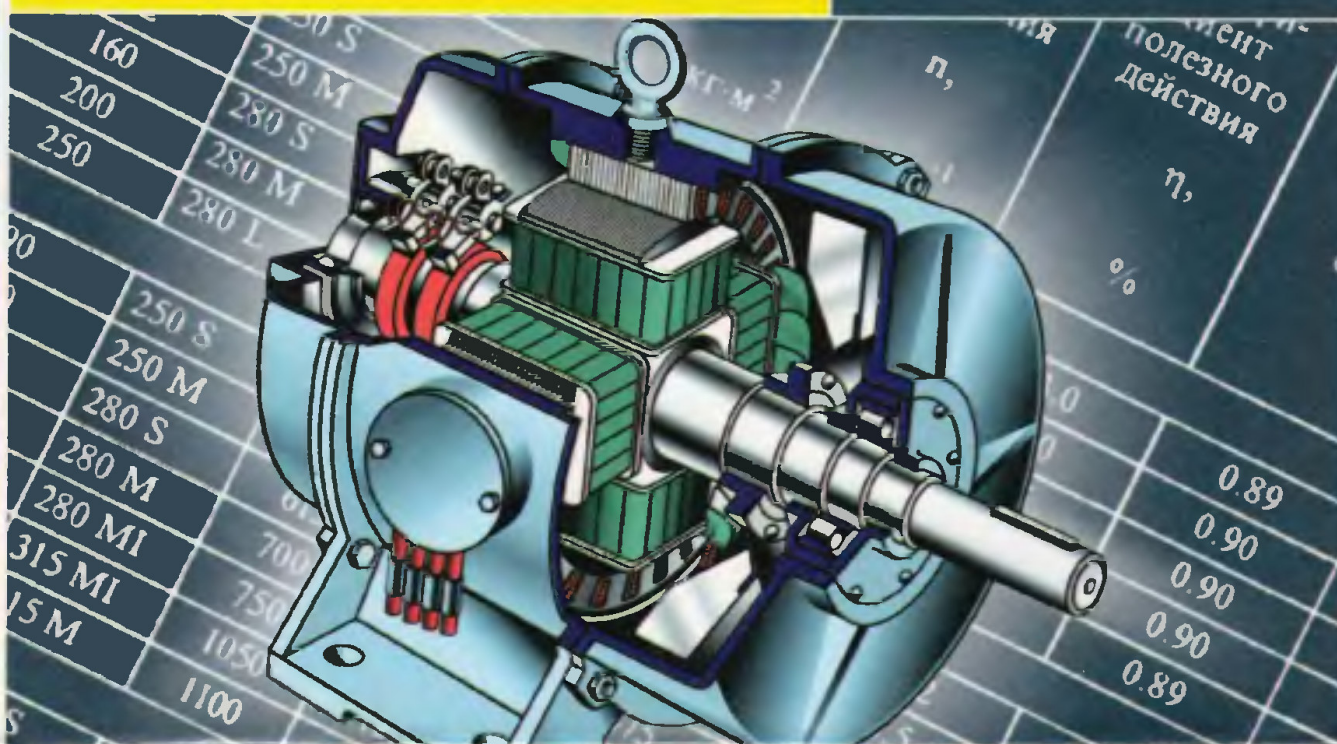
М. М. Кацман

СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



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. образоват. 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 общего, так и специального назначения, широко применяемым в современном электроприводе. Рассмотрены вопросы выбора и расчета мощности электродвигателей для электропривода в наиболее используемых режимах его работы, вопросы энергосбережения, технического обслуживания и техники безопасности при эксплуатации электрических машин.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования. Может быть полезен специалистам средней и высшей квалификации, работа которых связана с проектированием, эксплуатацией и ремонтом электромеханического оборудования.

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*

ISBN 5-7695-1686-0

© Кацман М. М., 2005

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2005

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2005

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 электровозов, 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-

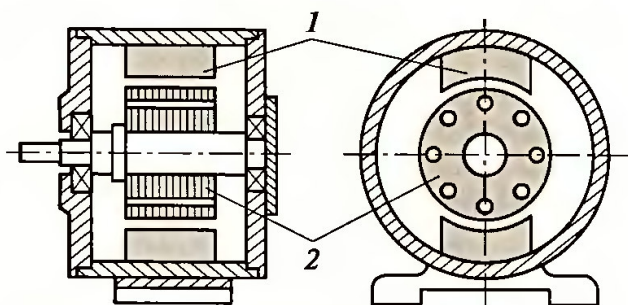


Рис. 1.1. Обобщенная конструктивная схема электрической машины вращательного действия

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,

$$F_{эм} = BIl. \quad (1.2)$$

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

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

$$Fv = F_{эм}v.$$

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

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

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 $F_{эм}$, 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, уравнивается 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),

$$UI = F_{эм}v + I^2r. \quad (1.5)$$

Из этого равенства следует, что электрическая мощность (UI), поступающая в электрический двигатель из сети, частично преобразуется в механическую мощность ($F_{эм}v$), 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-

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

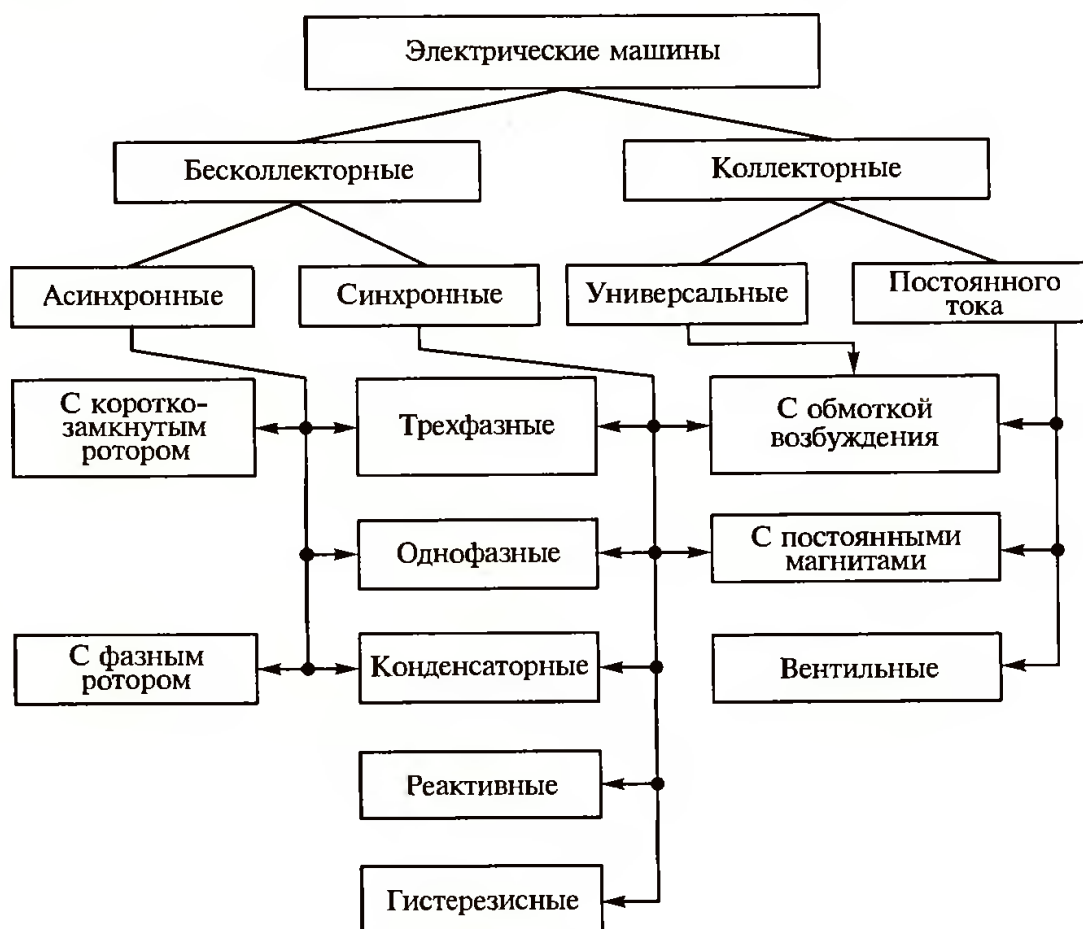


Рис. 1.2. Классификация электрических машин

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 $\sum P$.

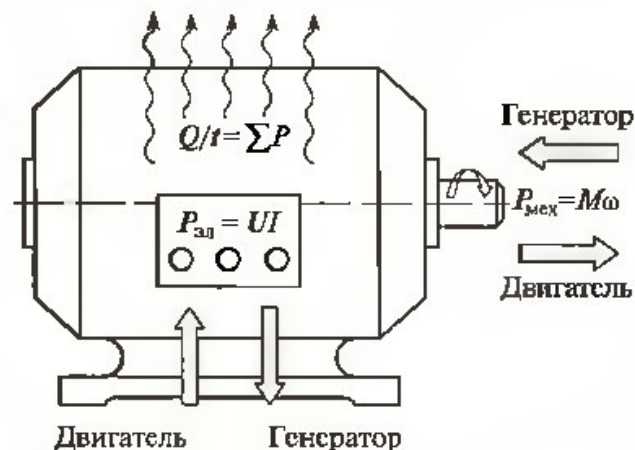


Рис. 1.3. К понятию о преобразовании энергии в электрической машине

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 деления 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 бóльшую 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 неизменном токе возбуждения и частоте вращения ($I_v = \text{const}$ и $n = \text{const}$);

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

регулировочная характеристика — зависимость тока возбуждения от тока нагрузки $I_v = f(I)$ при неизменных 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;

электромеханическая 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-

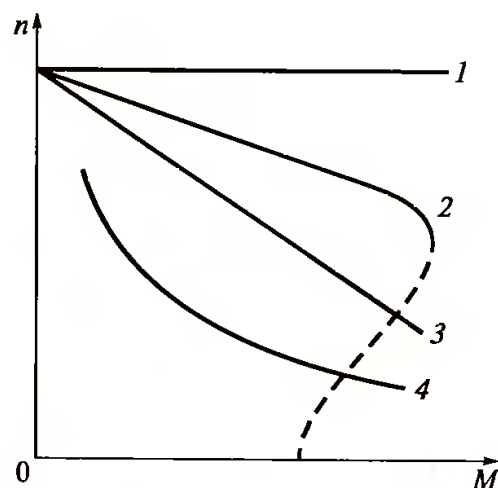


Рис. 1.4. Механические характеристики электродвигателей:

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

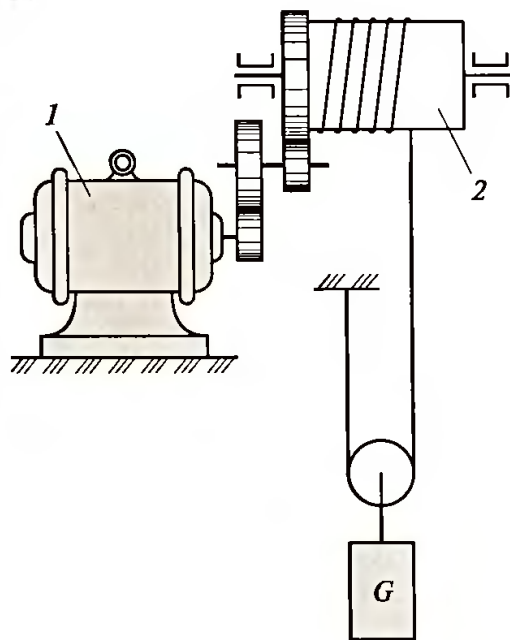


Рис. 1.5. Подъемный механизм (лебедка):
1 — двигатель; 2 — барабан

подвешенного груза m и определяется выражением, $\text{Н} \cdot \text{м}$,

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

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

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 ($P \equiv M_c n = \text{const}$) 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-

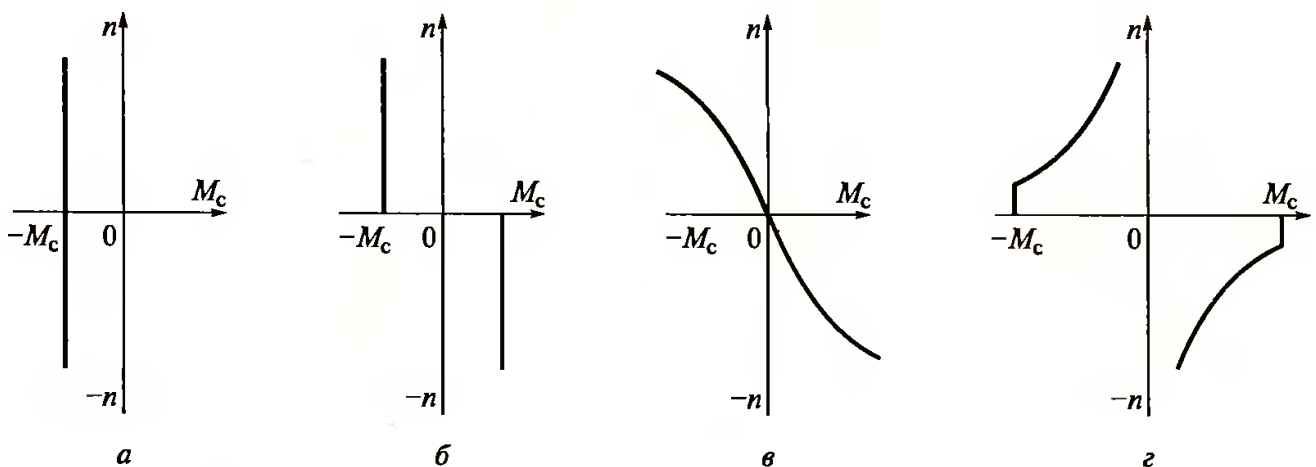


Рис. 1.6. Механические характеристики рабочих механизмов:

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

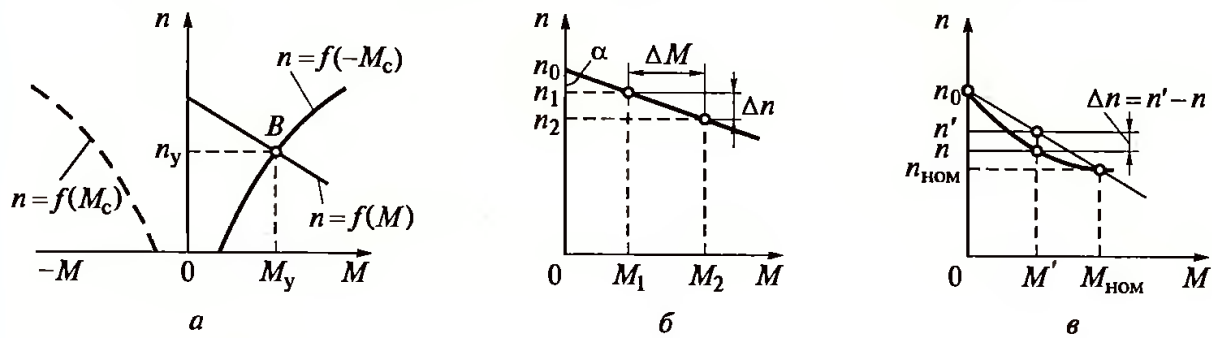


Рис. 1.7. К понятиям об установившемся режиме электропривода (а), жесткости (б) и нелинейности (в) характеристик

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 $n_{\text{НОМ}}$ (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

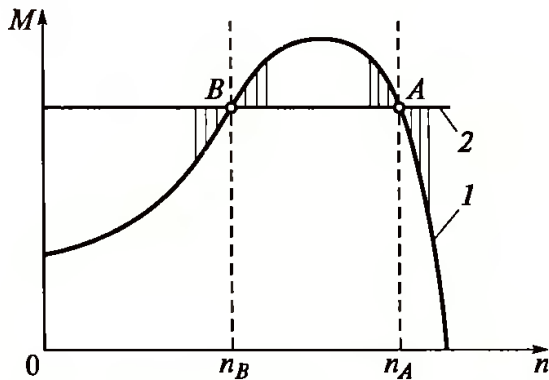


Рис. 1.8. К понятию устойчивости двигателя

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. Такими данными являются: номинальная мощность (кВт или кВ · 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