

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ГЛАВА 1

§ 1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Классификация по назначению. Электрические машины по назначению подразделяют на следующие виды:

*электромашинные генераторы**, преобразующие механическую энергию в электрическую. Их устанавливают на электрических станциях и различных транспортных установках: автомобилях, самолетах, тепловозах, кораблях, передвижных электростанциях и др. На электростанциях они приводятся во вращение с помощью мощных паровых и гидравлических турбин, а на транспортных установках - от двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин. В ряде случаев генераторы используют в качестве источников питания в установках связи, устройствах автоматики, измерительной техники и пр.;

электрические двигатели, преобразующие электрическую энергию в механическую; они приводят во вращение различные машины, механизмы и устройства, применяемые в промышленности, сельском хозяйстве, связи, на транспорте, в военном деле и быту. В современных системах автоматического управления их используют в качестве исполнительных, регулирующих и программирующих органов;

электромашинные преобразователи, преобразующие переменный ток в постоянный и, наоборот, изменяющие величину напряжения переменного и постоянного тока, частоту, число фаз и др. Их широко используют в промышленности, на транспорте и в военном деле, хотя в последнее десятилетие роль электромашинных преобразователей существенно уменьшилась вследствие применения статических полупроводниковых преобразователей;

электромашинные компенсаторы, осуществляющие генерирование реактивной мощности в электрических установках для улучшения энергетических показателей источников и приемников электрической энергии;

электромашинные усилители, используемые для управления объектами относительно большой мощности посредством электрических сигналов малой мощности, подаваемых на их обмотки возбуждения (управления). Роль электромашинных усилителей в последнее время также уменьшилась из-за широкого применения усилителей, выполненных на полупроводниковых элементах (транзисторах, тиристорах);

электромеханические преобразователи сигналов, генерирующие, преобразующие и усиливающие различные сигналы. Их выполняют обычно в виде электрических микромашин и широко используют в системах автоматического регулирования, измерительных и счетно-решающих

устройствах в качестве различных датчиков, дифференцирующих и интегрирующих элементов, сравнивающих и регулирующих органов и др.

Классификация по роду тока и принципу действия. Электрические машины по роду тока делят на машины переменного и постоянного тока. Машины переменного тока в зависимости от принципа действия и особенностей электромагнитной системы подразделяют на трансформаторы, асинхронные, синхронные и коллекторные машины.

Трансформаторы широко применяют для преобразования напряжения: в системах передачи и распределения электрической энергии, в выпрямительных установках, устройствах связи, автоматики и вычислительной техники, а также при электрических измерениях (измерительные трансформаторы) и функциональных преобразованиях (вращающиеся трансформаторы).

Асинхронные машины используют главным образом в качестве электрических двигателей трехфазного тока. Простота устройства и высокая надежность позволяют применять их в различных отраслях техники для привода станков, грузоподъемных и землеройных машин, компрессоров, вентиляторов и пр. В системах автоматического регулирования широко используют одно- и двухфазные управляемые асинхронные двигатели, асинхронные тахогенераторы, а также сельсины.

Синхронные машины применяют в качестве генераторов переменного тока промышленной частоты на электрических станциях и генераторов повышенной частоты в автономных источниках питания (на кораблях, самолетах и т. п.). В электрических приводах большой мощности применяют также синхронные электродвигатели. В устройствах автоматики широко используют различные синхронные машины малой мощности (реактивные, с постоянными магнитами, гистерезисные, шаговые, индукторные и пр.).

Коллекторные машины переменного тока используют сравнительно редко и главным образом в качестве электродвигателей. Они имеют сложную конструкцию и требуют тщательного ухода. В устройствах автоматики, а также в различного рода электробытовых приборах применяют универсальные коллекторные двигатели, работающие как на постоянном, так и на переменном токе.

Машины постоянного тока применяют в качестве генераторов и электродвигателей в устройствах электропривода, требующих регулирования частоты вращения в широких пределах: железнодорожный и морской транспорт, прокатные станы, электротрансмиссии большегрузных автомобилей, грузоподъемные и землеройные машины, сложные металлообрабатывающие станки и пр., а также в тех случаях, когда источниками электрической энергии для питания электродвигателей служат аккумуляторные батареи (стартерные двигатели, двигатели подводных лодок, космических кораблей и т. п.).

Генераторы постоянного тока часто применяют для питания устройств связи, зарядки аккумуляторных батарей, в качестве основных источников

питания на транспортных установках (автомобилях, самолетах, тепловозах, пассажирских вагонах). Однако в последнее время генераторы постоянного тока заменяются генераторами переменного тока, работающими совместно с полупроводниковыми выпрямителями.

В системах автоматического регулирования машины постоянного тока широко используют в качестве электромашинных усилителей, исполнительных двигателей и тахогенераторов.

В зависимости от назначения электрические микромашины автоматических устройств подразделяются на следующие группы:

силовые микродвигатели, приводящие во вращение различные механизмы автоматических устройств, самопишущих приборов и пр.;

управляемые (исполнительные) двигатели, преобразующие подводимый к ним электрический сигнал в механическое перемещение вала, т. е. отработывающие определенные команды;

тахогенераторы, преобразующие механическое вращение вала в электрический сигнал - напряжение, пропорциональное частоте вращения вала;

вращающиеся трансформаторы, дающие на выходе напряжение, пропорциональное той или иной функции угла поворота ротора, например синусу или косинусу этого угла или самому углу;

машины синхронной связи (сельсины, магнесины), осуществляющие синхронный и синфазный поворот или вращение нескольких механически не связанных между собой осей;

микромашины гироскопических приборов (гироскопические двигатели, датчики угла, датчики момента), осуществляющие вращение роторов гироскопов с высокой частотой и коррекцию их положения;

электромашинные преобразователи и усилители.

Электрические микромашины первых двух групп часто называют *силовыми*, а третьей - пятой групп - *информационными*.

Классификация по мощности. Электрические машины по мощности условно подразделяют на микромашины, машины малой, средней и большой мощности.

Микромашины имеют мощность от долей ватта до 500 Вт. Эти машины работают как на постоянном, так и на переменном токе нормальной и повышенной (400 - 2000 Гц) частоты.

Машины малой мощности - от 0,5 до 10 кВт. Они работают как на постоянном, так и на переменном токе нормальной или повышенной частоты.

Машины средней мощности - от 10 кВт до нескольких сотен киловатт *.

Машины большой мощности - свыше нескольких сотен киловатт. Машины большой и средней мощности обычно предназначают для работы на постоянном или переменном токе нормальной частоты**.

Классификация по частоте вращения. Электрические машины по частоте вращения условно подразделяют на: *тихоходные* - с частотами

вращения до 300 об/мин; *средней быстроходности* - 300-1500 об/мин; *быстроходные* - 1500 - 6000 об/мин; *сверхбыстроходные* - свыше 6000 об/мин. Микромашины выполняют для частот вращения от нескольких оборотов в минуту до 60000 об/мин; машины большой и средней мощности - обычно до 3000 об/мин.

§ 1.2. НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Каждая электрическая машина имеет паспортную табличку, выбитую на металлической пластине и прикрепленную к корпусу. В этой табличке указаны тип машины и ее *номинальные данные*, характеризующие основные энергетические показатели и условия работы, на которые она рассчитана. К номинальным данным относятся: мощность, напряжение, ток, частота вращения, частота переменного тока, коэффициент полезного действия, (КПД), число фаз, коэффициент мощности и режим работы (длительный, кратковременный и т. п.)*. Кроме того, в паспортной табличке приведены следующие данные: завод-изготовитель, год выпуска, класс изоляции, а также дополнительные данные, необходимые для монтажа и эксплуатации машины (масса, схема включения обмоток и др.). Термин «номинальный» можно применять и к величинам, не приведенным в паспортной табличке, но относящимся к ее номинальному режиму, например номинальный вращающий момент, номинальное скольжение и др.

Номинальной мощностью электрической машины называют мощность, на которую рассчитана данная машина по условиям нагревания и безаварийной работы в течение установленного срока службы. Для электрических двигателей под номинальной мощностью понимают полезную механическую мощность на валу, выраженную в ваттах или киловаттах; для генераторов постоянного тока — полезную электрическую мощность на зажимах машины (в ваттах или киловаттах); для генераторов переменного тока — полную электрическую мощность на зажимах (в вольт-амперах или киловольт-амперах). Номинальные мощности всех видов электрических машин и трансформаторов стандартизованы; точно так же стандартизованы номинальные частоты вращения электрических машин.

Электрические машины могут работать и при ненормальных условиях (уменьшенная или увеличенная мощность, напряжение и ток, отличные от номинальных, и т. п.). Однако при работе в этих условиях энергетические показатели машины отличаются от паспортных данных. Обычно при нагрузках, *меньших номинальной, КПД и коэффициент мощности машины* меньше номинальных. При нагрузках, больших номинальной, появляется опасность чрезмерного повышения температуры частей электрической машины, в первую очередь ее обмоток, что может привести к преждевременному выходу из строя изоляции обмоток и, следовательно, всей машины. Максимально допустимая температура обмотки зависит от свойств применяемой изоляции (ее класса) и срока службы машины и составляет от 105 до 180°C. Предельно допустимые температуры различных частей обмоток регламентируются общесоюзными стандартами (ГОСТами), имеющими силу законов.

В ГОСТы на электрические машины и трансформаторы включаются также другие нормативные материалы, главным образом определяющие допустимые кратковременные перегрузки и методы испытания машины и отдельных ее частей, а также основные условия эксплуатации машины

данного типа. Материалы, включаемые в ГОСТы, проверены многолетней практикой производства и эксплуатации, т. е. имеют статистическое обоснование.

Эксплуатация и производство новых видов электрических машин нормируются *техническими условиями*, которые согласовываются и утверждаются организациями, проектирующими, изготавливающими и эксплуатирующими данные машины.

Электрические машины являются обратимыми, т. е. они могут работать и в генераторном, и в двигательном режимах. Точно так же в электромашинном преобразователе и трансформаторе направление преобразования электрической энергии может быть изменено на обратное. Однако выпускаемые электропромышленностью машины обычно предназначаются для предпочтительной работы в каком-то одном режиме. Это позволяет лучше приспособить машину к требованиям эксплуатации, не делая ее чрезмерно тяжелой и дорогой.

Электрические машины выпускают на стандартные напряжения, согласованные со стандартными напряжениями электрических сетей. Стандартные напряжения генераторов примерно на 5 — 10% выше, чем двигателей; например, если стандартное напряжение двигателя 220 В, то стандартное напряжение генератора — 230 В и т. п. Разница в стандартных напряжениях двигателей и генераторов обусловлена потерями напряжения в электрических сетях, к которым подключены генераторы и двигатели. В трансформаторах стандартные напряжения на первичных обмотках принимаются равными «двигательным», а на вторичных обмотках — «генераторным».

Машины переменного тока предназначены, как правило, для работы с синусоидальным напряжением, симметричным по фазам. Неизбежные отклонения от этих условий регламентируются ГОСТами. Так, например, длительные отклонения по значению напряжения в сети, питающей силовое оборудование, не должны превышать — 5 % и +10 %; коэффициент искажения синусоидальной кривой должен быть не более 5% и т. п. Машины, работающие совместно с вентильными преобразователями, обычно имеют несинусоидальное напряжение и ток, что вызывает в них дополнительные потери энергии и повышает температуру обмоток и магнитопровода машины. Режимы работы таких машин регламентируются специальными техническими условиями.

§ 1.3. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

Общие технические требования. Электрические машины должны иметь высокую надежность работы, хорошие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности), по возможности минимальные габаритно-установочные размеры, массу и стоимость: они должны быть простыми по конструкции, не сложными в изготовлении и удобными в обслуживании и эксплуатации. Общие технические требования для машин общепромышленного применения сформулированы в специальном ГОСТе, а для машин специального исполнения — в соответствующих ГОСТах, учитывающих специфические условия работы этих машин.

Каждая электрическая машина рассчитана на работу при вполне определенных условиях эксплуатации: режиме нагрузки, допускаемых перегрузках, напряжении, частоте переменного тока, частоте вращения, температуре охлаждающей среды, высоте над уровнем моря, влажности и др. При этом машина должна развивать номинальную мощность и работать без аварий и повреждений в течение установленного времени (обычно в течение времени между периодическими ремонтами).

Надежность работы машины обеспечивается путем закладки достаточных запасов при проектировании, применения высококачественной технологии изготовления и правильной эксплуатации (работы машины в режимах, для которых она спроектирована, и своевременного выполнения профилактических ремонтов).

При проектировании должны быть обеспечены:

1. механическая прочность всех элементов машины (вала, станины, ротора, статора, деталей крепления обмоток и пр.). В частности, машины должны без повреждений и деформаций выдерживать кратковременные перегрузки по току и кратковременные превышения номинальной частоты вращения;
2. электрическая прочность изоляции обмоток, которая не должна терять своих качеств при длительной эксплуатации машины. Изоляция обмоток относительно корпуса, изоляция между обмотками и изоляция между витками обмоток должна выдерживать повышенное по сравнению с номинальным испытательное напряжение. Сопротивление изоляции всех обмоток должно соответствовать значениям, указанным в ГОСТе;
3. достаточное охлаждение элементов машины, в которых при работе выделяется теплота (магнитопровода, скользящих контактов, обмоток, подшипников).

Наиболее чувствительными к нагреванию являются электроизоляционные материалы обмоток, от качества которых зависит допустимый уровень

нагрева электрической машины. Максимальные температуры всех частей машины не должны превышать значений, указанных в ГОСТах;

1. выбор электромагнитных нагрузок (плотности тока в обмотках и индукции в элементах магнитопровода), при которых выделяемая в обмотках и магнитопроводе теплота успевает отводиться из машины системой ее охлаждения и не вызывает недопустимого нагрева машины;
2. применение в машинах постоянного тока ряда конструктивных мер (введение добавочных полюсов и компенсационной обмотки, выбор соответствующих марок щеток), которые предотвращают недопустимое искрение на коллекторе при номинальной нагрузке.

В основном электрические машины работают в качестве преобразователей энергии (двигатели, генераторы, трансформаторы, электромашинные преобразователи). Поэтому для уменьшения эксплуатационных расходов важное значение имеют энергетические показатели машин: КПД и коэффициент мощности. При проектировании электрической машины путем оптимального выбора ее основных параметров и электромагнитных нагрузок стремятся получить наивыгоднейшие значения КПД и коэффициента мощности при номинальной нагрузке. Однако эти значения связаны определенным образом с номинальной мощностью машины, поэтому чем меньше номинальная мощность электрической машины, тем меньше ее КПД и коэффициент мощности.

Требования, предъявляемые к электрическим микромашинам автоматических устройств. Электрические микромашины кроме общих технических требований должны также обеспечивать:

1. высокую точность преобразования входного сигнала в выходной, например частоту вращения в выходное напряжение в тахогенераторах или управляющее напряжение в частоту вращения в исполнительных двигателях;
2. стабильность выходных характеристик при изменении условий эксплуатации, например температуры окружающей среды;
3. линейность характеристик при изменении управляющего сигнала и нагрузки;
4. высокое быстродействие;
5. широкий диапазон регулирования.

Для выполнения этих требований при создании электрической микромашины в ряде случаев отступают от принципов оптимального проектирования, принятых для машин средней и большой мощности. Так, например, для уменьшения погрешностей в информационных электрических микромашинах выбирают относительно небольшие электромагнитные нагрузки и увеличивают воздушный зазор между статором и ротором. В

исполнительных двигателях и других микромашинах, выполняющих силовые функции, для увеличения развиваемого машиной момента электромагнитные нагрузки выбирают максимально возможными по условиям отвода теплоты от машины. Все это приводит к ухудшению энергетических показателей — КПД и коэффициента мощности, которые весьма важны для электрических машин средней и большой мощности, однако в микромашинах показатели, характеризующие точность, быстродействие, диапазон регулирования, могут иметь преобладающее значение.

Кроме перечисленных требований к отдельным видам микромашин предъявляют специфические требования, обусловленные особенностями их эксплуатации. Так, микромашины, применяемые в звукозаписывающей и звуковоспроизводящей аппаратуре, должны иметь низкий уровень создаваемых шумов; микромашины, используемые в радиоаппаратуре, не должны создавать значительных радиопомех; при установке их, например, в ядерных реакторах и космических аппаратах должна быть обеспечена радиационная устойчивость. Все это также накладывает определенные ограничения на конструкции соответствующих микромашин и приводит к увеличению их массы, габаритных размеров и ухудшению энергетических показателей.

§ 1.4. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ УСЛОВИЯМИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Защита от внешних воздействий. Конструктивное выполнение электрической машины во многом определяют требования, предъявляемые к защите ее от внешних воздействий. В зависимости от этого ГОСТ устанавливает буквенно-цифровое обозначение исполнений электрических машин, состоящее из двух букв IP (International Protection) и двух цифр. Первая цифра (от 0 до 6) характеризует степень защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины и от попадания внутрь ее твердых посторонних предметов. Вторая цифра (от 0 до 8) характеризует степень защиты машины от проникновения в нее влаги.

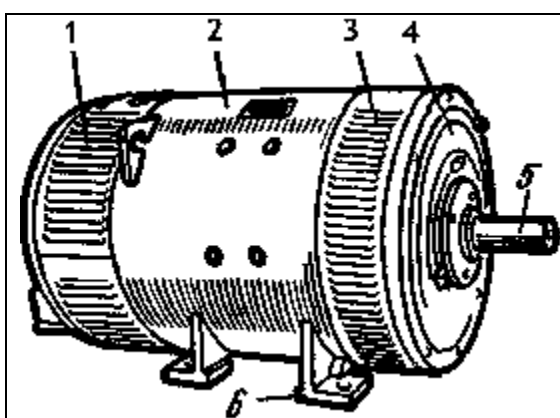


Рис. 1.1. Двигатель постоянного тока защищенного исполнения (степень защиты IP22): 1, 3 — вентиляционные окна для входа и выхода охлаждающего воздуха; 2 — станина; 4 — подшипниковый щит; 5 — вал; 6 — лапы

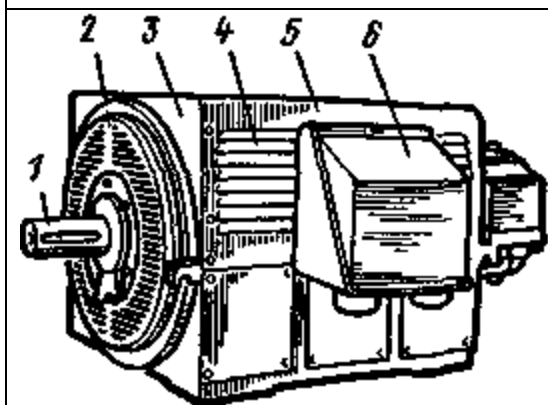


Рис. 1.2. Асинхронный двигатель каплезащищенного исполнения (степень защиты IP23): 1 — вал; 2, 4 — вентиляционные окна для входа и выхода охлаждающего воздуха; 3 — подшипниковый щит; 5 — станина; 6 — коробка с выводами

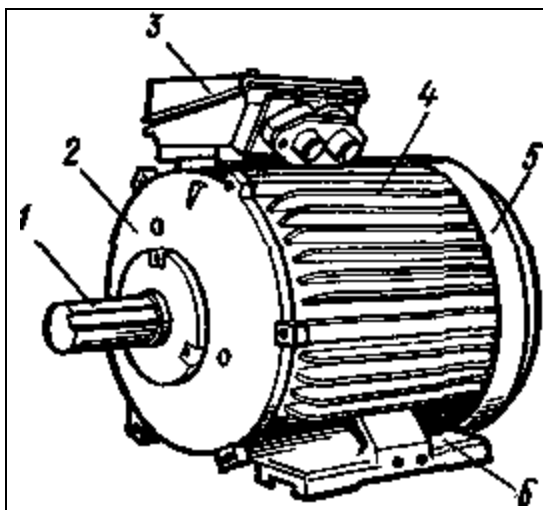


Рис. 1.3. Асинхронный двигатель закрытого исполнения (степень защиты IP44):

1 — вал; 2, 5 — подшипниковые щиты; 3 — коробка с выводами; 4 — охлаждающие ребра станины; 6 — лапы

Различают следующие виды исполнения электрических машин: открытое, защищенное, каплезащищенное, брызгозащищенное, водозащищенное, пылезащищенное, закрытое, герметичное, взрывозащищенное.

Открытое (IP00) — машина не имеет специальных приспособлений, предохраняющих от попадания внутрь посторонних предметов и случайного соприкосновения обслуживающего персонала с токопроводящими и вращающимися частями; машины открытого исполнения встречаются редко и лишь в устаревших конструкциях.

Защищенное (IP21—IP22 и др.) — машины имеют специальные приспособления, выполненные, например, в виде соответствующих крышек, кожухов, сеток (рис. 1.1). При этом междукрышками и щитами или станиной машины оставляют щели, необходимые для циркуляции воздуха, охлаждающего машину. Такие машины могут устанавливаться только в закрытых помещениях, так как они не имеют приспособлений, защищающих от дождя.

Брызгозащищенное и каплезащищенное (IP23 — IP24 и др.) — машины снабжены приспособлениями, защищающими их от проникновения к токоведущим и вращающимся частям капель воды или водяных брызг (рис. 1.2). В этих машинах все отверстия, расположенные в верхней части корпуса и подшипниковых щитов, закрывают глухими крышками; отверстия, расположенные сбоку, обычно защищают кожухами, крышками и жалюзи, а расположенные снизу — сетками. Такие машины могут устанавливаться на открытом воздухе.

Водозащищенное (IP55—IP56) — машины недоступны проникновению внутрь струй воды любого направления (также снизу). В них предусмотрены усиленные уплотнения резиновыми прокладками и сальниками. Случайно попавшая в машину вода вытекает из нее или удаляется охлаждающим воздухом. Подобные машины применяют главным образом на судовых установках.

Пылезащищенное (IP65 — IP66) — машины защищены от попадания внутрь пыли в опасных для нормальной работы количествах.

Закрытое (IP44 — IP54) — внутреннее пространство машины изолировано от внешней среды (рис. 1.3). Такие машины применяют для работы в пыльных помещениях, на движущихся транспортных средствах (автомобилях, железнодорожных вагонах, локомотивах), в авиации и пр. К закрытому исполнению относят также машины с охлаждением по замкнутому циклу (воздухом, водородом и др.).

Герметичное (IP67—IP68) — машины выполняют с особо плотной изоляцией от окружающей среды, предотвращающей сообщение ее с внутренним пространством при определенной разности давлений снаружи и внутри машины. Такие машины могут работать под водой (водонепроницаемые машины), в наполненных газом камерах (газонепроницаемые) и в других подобных средах.

Имеются также исполнения машин, предназначенных для работы в особых условиях:

Взрывозащищенное (взрывобезопасное) — машины могут работать во взрыво- и пожароопасной среде, так как изоляция их токоведущих и вращающихся частей от внешней среды исключает возникновение взрыва и воспламенения газов в окружающем пространстве при искрении и других ненормальных явлениях. При взрыве внутри машины накопившихся газов возникающее пламя **не** может проникнуть в окружающую среду.

Влагостойкое — для работы в условиях большой влажности.

Морозостойкое — для работы при особо низких температурах и при возможном образовании инея.

Химостойкое — для работы в условиях наличия паров агрессивных химических веществ и при воздействии химических реагентов.

Тропикостойкое — для работы в тропических условиях при возможном образовании плесневых грибов.

Климатические условия и условия размещения. При эксплуатации электрических машин в нормальных климатических условиях температура окружающей среды составляет $(25 + 10)^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха 35 — 80 % и атмосферное давление 84—106 кПа. В зависимости от макроклиматических условий ГОСТ предусматривает различные их климатические исполнения, которым присваиваются определенные обозначения. Электрические двигатели, предназначенные для эксплуатации на суше, реках и озерах в макроклиматических районах с умеренным климатом, имеют обозначение—У; с холодным —ХЛ; с влажным тропическим — ТВ; с сухим тропическим — ТС; с сухим и с влажным тропическим — Т; для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение) — О. Двигатели, предназначенные для установки на морских судах в макроклиматических районах с умеренно-холодным морским климатом, имеют обозначение М, с тропическим морским — ТМ; для неограниченного района плавания — ОМ; двигатели, предназначенные для всех макро климатических районов на суше и на море,— В.

В зависимости от условий размещения ГОСТ предусматривает различные исполнения электрических двигателей, которым также присваиваются определенные обозначения. Двигатели, которые могут эксплуатироваться на открытом воздухе, имеют обозначение 1; в закрытом помещении, где температура и влажность воздуха несущественно отличаются от наружного воздуха,— 2; в закрытых помещениях, в которых колебания температуры и влажности, а также воздействие песка и пыли на машину существенно меньше, чем на открытом воздухе, -3; в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями (например, в закрытых отапливаемых помещениях) - 4; в помещениях с повышенной влажностью (например, в неотапливаемых и невентилируемых подземных помещениях) - 5. Например, двигатели, которые могут работать в районах с холодным климатом при установке на открытом воздухе, имеют обозначение ХЛ1; в районах с умеренным климатом в закрытых помещениях — У3 или У4.

В зависимости от климатического исполнения машины и условий ее размещения соответственно изменяют конструкцию ее корпуса, применяют различные уплотнения, усиливают изоляцию обмоток и осуществляют другие конструктивные меры, обеспечивающие нормальную эксплуатацию машины в течение установленного срока.

Способ охлаждения. Для предотвращения чрезмерного нагрева частей машины (теплота, выделяющаяся в ней, зависит от значения потерь мощности) применяют различные способы охлаждения электрических машин. Способ охлаждения зависит от вида исполнения машины и ее мощности. При повышении мощности электрической машины требуется увеличивать интенсивность ее охлаждения.

Электрические микромашины обычно не имеют искусственного охлаждения. Отвод теплоты от нагретых частей (обмоток, ротора, статора, коллектора) осуществляется у них за счет естественной теплоотдачи окружающей среде (машины с естественным охлаждением).

Вращающиеся электрические машины малой, средней и большой мощности выполняют с искусственным охлаждением. В этих машинах с помощью специальных приспособлений достигается увеличение скорости движения охлаждающей среды. Для большинства электрических машин охлаждающей средой служит воздух, но иногда для этой цели применяют водород. Такие машины называют *вентилируемыми*. Вентилируемые машины, у которых охлаждающий воздух или иной газ проходит через внутреннее пространство машины, называют *продуваемыми*; если же они обдувают только наружную поверхность машины — *обдуваемыми*.

Обозначение способов охлаждения состоит из букв IC (International Cooling) и двух цифр: первая (от 0 до 6) условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая (от 0 до 7) — способ его перемещения.

Вращающиеся электрические машины малой и средней мощности обычно выполняют с самовентиляцией. В этом случае охлаждение нагретых частей

осуществляется вентилятором, который насаживают на вал ротора. В некоторых машинах вентиляторами являются вентиляционные лопасти или другие приспособления, пристраиваемые к торцовой части сердечника ротора.

Машины закрытого исполнения обычно выполняют обдуваемыми (рис. 1.4, а). В таких машинах вентилятор обдувает внешнюю поверхность корпуса, способствуя более интенсивному отводу от него теплоты (IC01).

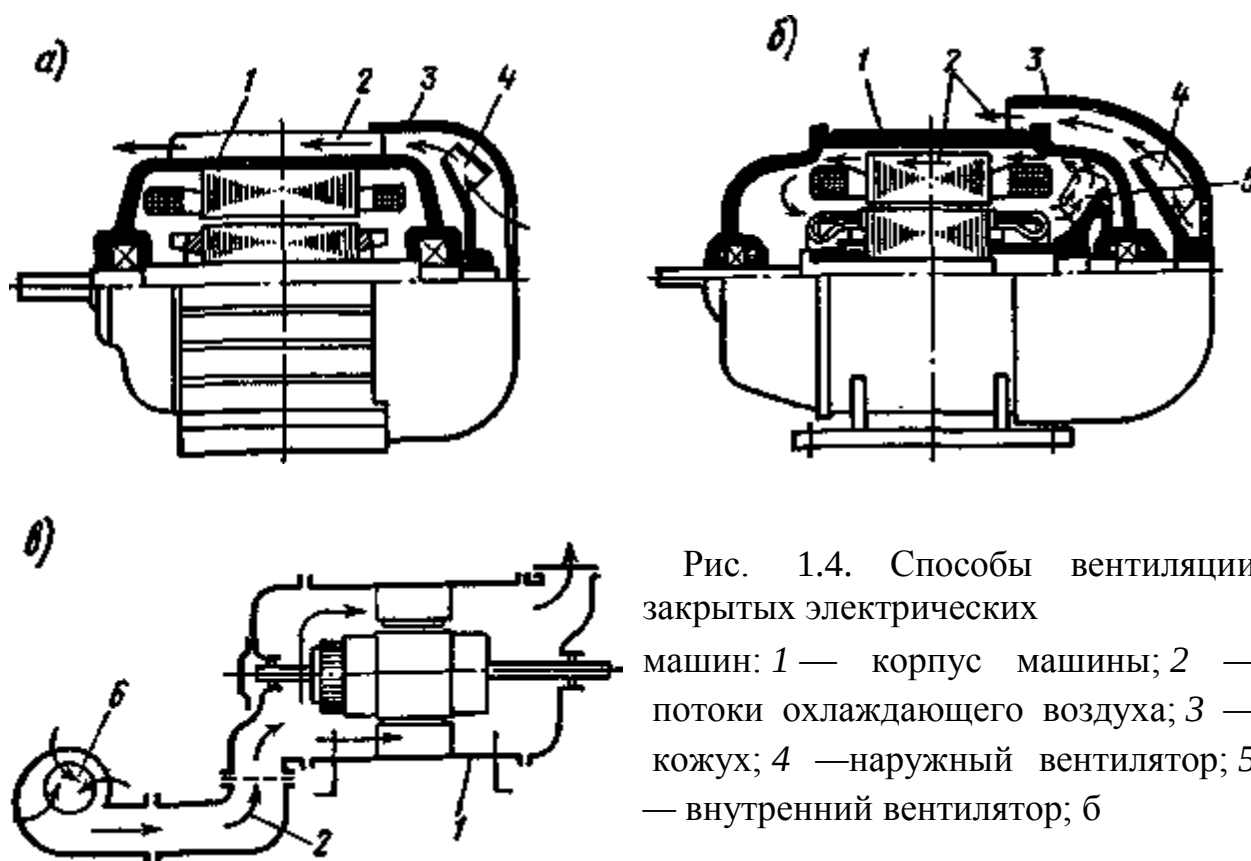


Рис. 1.4. Способы вентиляции закрытых электрических машин: 1 — корпус машины; 2 — потоки охлаждающего воздуха; 3 — кожух; 4 — наружный вентилятор; 5 — внутренний вентилятор; 6 — независимая вентиляция

Для увеличения поверхности охлаждения станины закрытых машин обычно снабжают наружными охлаждающими ребрами. Иногда на валу ротора устанавливают также внутренний вентилятор (рис. 1.4, б), обеспечивающий дополнительную циркуляцию воздуха внутри машины и усиление интенсивности теплообмена между ее закрытыми частями и станиной. В закрытых машинах большой мощности часто применяют независимую вентиляцию, при которой охлаждающий воздух прогоняется через машину вспомогательным вентилятором (рис. 1.4, в), приводимым во вращение отдельным электродвигателем (IC17). В электрических машинах, применяемых в авиации, вместо вентилятора для продува охлаждающего воздуха через машину используется аэродинамический напор, возникающий при движении самолета.

В машинах открытого, защищенного, а также брызго-, капле- и водозащищенного исполнения охлаждающий воздух обычно прогоняется

вентилятором вокруг обмоток и по вентиляционным каналам, имеющимся в статоре, роторе и коллекторе.

Система вентиляции может быть осевой и радиальной. В случае осевой системы (рис. 1.5, а) охлаждающий воздух проходит через машину в направлении оси вала, в случае радиальной (рис. 1.5, б) — в радиальном направлении. В зависимости от места установки вентилятора осевая система вентиляции может быть вытяжной или нагнетательной. При вытяжной системе (рис. 1.6, а) вентилятор устанавливают в месте выхода воздушного потока из машины; при нагнетательной (рис. 1.6, б) — в месте входа его в машину. В некоторых случаях применяют комбинированную радиально-осевую систему вентиляции.

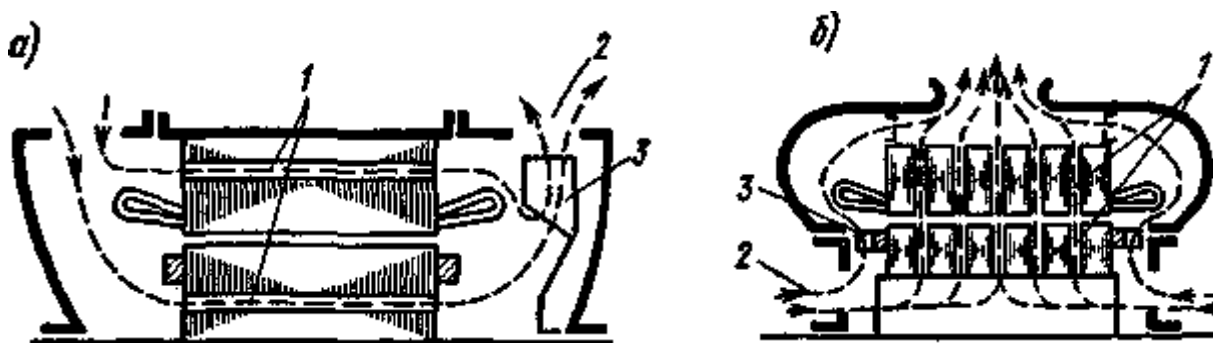


Рис. 1.5. Осевая и радиальная системы вентиляции открытых и защищенных электрических машин: 1 — вентиляционные каналы; 2 — потоки охлаждающего воздуха; 3 — вентилятор

В качестве охлаждающего агента в машинах большой мощности иногда применяют водород. Использование водорода позволяет уменьшить потери мощности, вызываемые трением между частями машины и потоком охлаждающего газа, и улучшить отвод теплоты, так как водород имеет меньшую плотность и большую теплопроводность, чем воздух. В машинах, в которых требуется обеспечить высокую интенсивность охлаждения, применяют жидкостное охлаждение, используя для этой цели трансформаторное масло, дистиллированную воду, керосин и т. п.

В машинах с жидкостным охлаждением охлаждающую жидкость (трансформаторное масло, дистиллированную воду); обычно пропускают непосредственно через полые проводники, обмотки ротора и статора или по специально охлаждающим каналам, выполненным в виде встроенных в обмотку тонкостенных коробок из немагнитного материала. Если охлаждение осуществляют за счет испарения жидкости, то систему охлаждения называют *испарительной*. В одной машине могут быть применены одновременно несколько охлаждающих агентов, например водородное охлаждение ротора и водяное охлаждение статора.

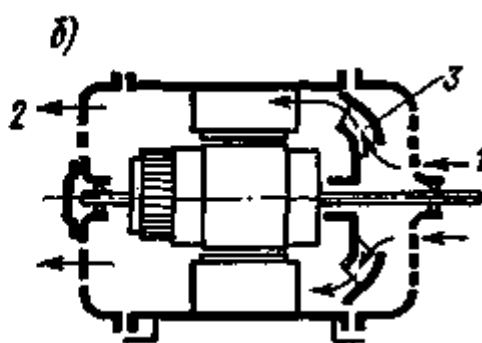
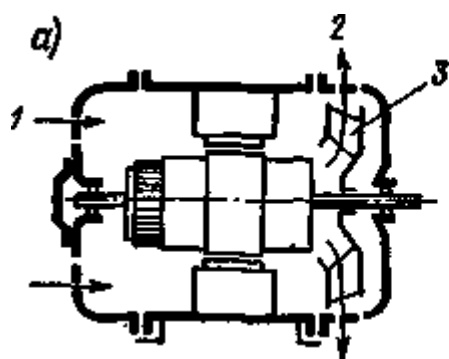


Рис. 1.6.
Вытяжная и нагнетательная системы вентиляции: 1 — входящий воздух; 2 — выходящий воздух; 3 — вентилятор

Электрические машины большой мощности обычно имеют замкнутую систему вентиляции с охлаждением нагретого воздуха, водорода, воды или масла в специальных теплообменниках (охладителях), охлаждаемых водой или воздухом. Иногда охладитель встраивают непосредственно в машину.

В трансформаторах требуемая интенсивность охлаждения также зависит от мощности. Трансформаторы малой мощности выполняют с естественным воздушным охлаждением; их называют *сухими трансформаторами*. Трансформаторы средней и большой мощности имеют обычно жидкостное охлаждение, при котором сердечник и обмотки помещают в бак, заполненный трансформаторным маслом или негорючим жидким диэлектриком. Более подробно способы охлаждения трансформаторов и мощных синхронных генераторов рассмотрены в § 2.3 и 6.3.

Установка и крепление. Для установки и крепления машины в ее конструкции предусматривают лапы на станине (рис. 1.7, а) и фланцы на подшипниковом щите или на станине (рис. 1.7, б).

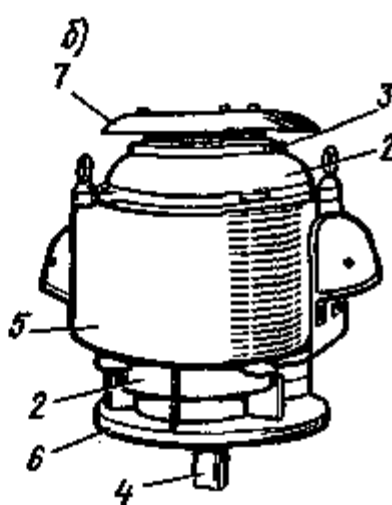
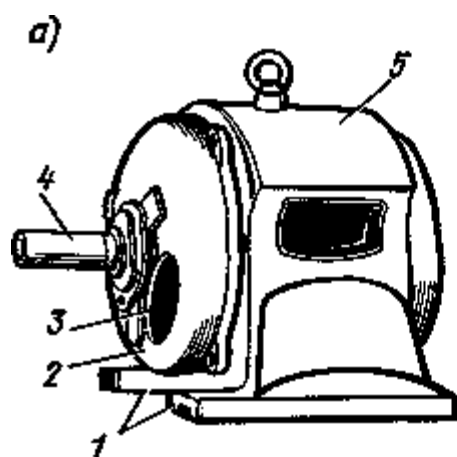


Рис. 1.7. Общий вид электрических машин: а — с креплением с помощью лап; б — с фланцевым креплением и вертикальным расположением зала; 1 — лапы для крепления; 2 — подшипниковый щит; 3 — вентиляционные окна для входа охлаждающего воздуха; 4 — вал; 5 —

станина; 6 — фланец; 7
— крышка

В зависимости от способа установки и крепления, направления оси вала и конструкции подшипниковых узлов, электрические машины, согласно стандарту СЭВ, разделяют на девять конструктивных групп. Каждая из них подразделяется на виды, состоящие из нескольких форм исполнения. Всем им присвоены соответствующие обозначения, которые содержат буквы IM (International Mounting) и четыре цифры: первая определяет конструктивную группу, вторая и третья — способ монтажа, четвертая (от 0 до 8) — форму конца вала. Имеются следующие конструктивные группы: IM1 — машина на лапах с подшипниковыми щитами; IM2 — на лапах с подшипниковыми щитами и фланцем на одном щите; IM3 — без лап с подшипниковыми щитами и фланцем на одном щите; IM4 — без лап с подшипниковыми щитами и фланцем на станине; IM5 — без подшипников; IM6 — с подшипниковыми щитами и стоячковыми подшипниками; IM7 — со стоячковыми подшипниками (без щитов); IM8 — с вертикальным валом (не охватываемые группами IM1—IM4); IM9 — специальное исполнение. В табл. 1.1 приведены некоторые примеры конструктивных форм исполнения электрических машин.

Концы валов электрических машин имеют стандартные размеры. Стандарты устанавливают строго фиксированные высоты осей вращения электрических машин, а также конструкции и размеры мест крепления.

Виброакустические условия. При проектировании и изготовлении электрических машин во многих случаях применяют специальные конструктивные меры для уменьшения шума.

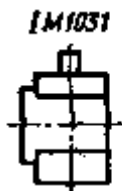
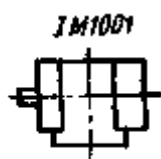
В электрических машинах шумы возникают по механическим, вентиляционным и магнитным причинам.

Механические шумы возникают из-за вибрации отдельных частей машины вследствие неточной балансировки ротора, трения щеток о коллектор, трения в подшипниках и др. Для снижения механического шума осуществляют точную динамическую балансировку ротора, увеличивают жесткость вала, применяют высококачественные подшипники, тщательно притирают щетки, повышают жесткость щеткодержателей и выполняют коллектор со строго цилиндрической и гладкой поверхностями.

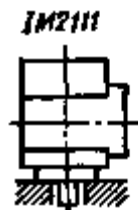
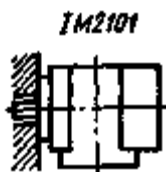
Вентиляционные шумы обусловлены колебаниями давления воздушного потока, охлаждающего машину, и вихрями на отдельных участках системы охлаждения. Снижение вентиляционного шума достигается рациональной конструкцией вентилятора и всей системы охлаждения, повышением жесткости вентилятора, тщательной его балансировкой и установлением достаточно большого зазора между вентилятором и подшипниковым щитом.

Магнитные шумы появляются из-за вибрации отдельных частей магнитной системы электрической машины под действием переменных электромагнитных сил, возникающих в результате изменения магнитной

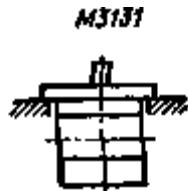
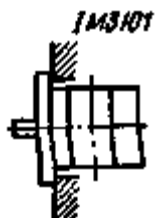
проводимости воздушного зазора при вращении зубчатого якоря, явления магнитоstriction, а в машинах *переменного* тока и трансформаторах — вследствие



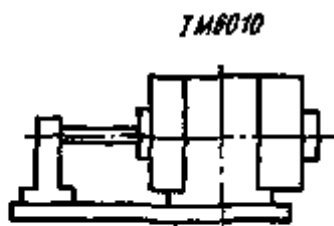
На лапах с подшипниковыми щитами (группа IM1)



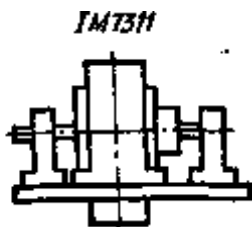
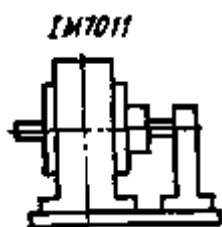
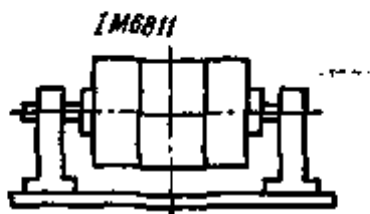
На лапах с двумя подшипниковыми щитами с фланцем на подшипниковом щите (группа IM2)



Без лап с подшипниковыми щитами с фланцем на одном подшипниковом щите (группа IM3)



На лапах с подшипниковыми щитами и стоячковыми подшипниками (группа IM6)



На лапах со стоячковыми подшипниками (без подшипниковых щитов) (группа IM7)

периодического перемангничивания магнитопровода. Уменьшение шума достигается рациональным выбором числа зубцов ротора и статора, созданием эксцентрического воздушного зазора (в машинах постоянного тока), скосом зубцов ротора, применении полужакрытых пазов и др.

Допускаемые уровни шума электрических машин строго нормированы. Для оценки шума принят средний (для нескольких точек) уровень звука A , измеренный на расстоянии $d=1$ м от контура машины (обозначается $Ld1A$), а для некоторых машин специального исполнения — также и средний уровень звука A , измеренный на опорном радиусе 3 м (обозначается $LA3$). Уровень звука (дБ) определяется отношением $A = 20 \lg(p/p_0)$, где p — звуковое давление в данной точке. Па, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — звуковое давление, соответствующее порогу слышимости.

В зависимости от требований, предъявляемых к уровню шума, электрические машины подразделяют на следующие классы: 0; 1; 2; 3; 4. Так, например, для машин класса 1 уровень звука $Ld1A$ в режиме холостого хода не должен превышать 64—109 дБ, а уровень звука $LA3$ — не должен превышать 55—104 дБ.

К классу 0 относят машины, работающие в кратковременном и повторно-кратковременном режимах, с принудительной вентиляцией от постороннего вентилятора, облегченной массы, многополюсные с числом полюсов более 12, некоторые типы однофазных и индукторных генераторов, сварочные генераторы и преобразователи, многоскоростные асинхронные двигатели, двигатели с повышенным пусковым моментом и повышенным скольжением и пр.; к классу 1 — машины постоянного тока, асинхронные, синхронные и коллекторные машины нормального исполнения; к классу 2 — машины с малошумными подшипниками, со специальными малошумными вентиляторами и т. п.; к классу 3 — машины с пониженным использованием активных материалов, закрытые, с глушителями вентиляционного шума; к классу 4 — машины с звукоизолирующим кожухом или другими специальными конструктивными узлами, обеспечивающими снижение шума.

Снижение радиопомех. Коллекторные машины постоянного и переменного тока являются интенсивными источниками радиопомех. Возникающее в этих машинах искрение под щетками создает импульсные колебания тока и напряжения, имеющие непрерывный частотный спектр. В результате этого образуются помехи радиоприему в виде резкого треска или непрерывного шума во всем диапазоне частот, принятых для радиосвязи.

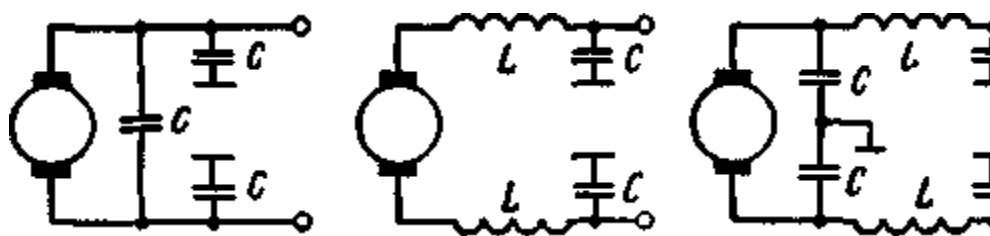


Рис. 1.8.
Схемы
помехоподав-
ляющих
фильтров

Уровень помех, распространяемых по проводам и кабелям, присоединенным к электрической машине, определяют по измеренному на зажимах машины напряжению (в микровольтах). Уровень помех, излучаемых машиной в окружающее пространство, определяют по максимальному напряжению (в микровольтах), которое измеряют на однометровой

штыревой антенне, установленной на определенном расстоянии от машины; эту величину называют *уровнем поля*. Уменьшения радиопомех достигают путем снижения степени искрения, экранирования самой машины и подводимых к ней проводов и применения помехоподавляющих фильтров, препятствующих распространению высокочастотных колебаний по проводам сети, к которой присоединена машина. Наиболее простыми помехоподавляющими фильтрами являются емкостные, представляющие собой конденсаторы C , включаемые между токопроводящими зажимами, а также между этими зажимами и корпусом машины (рис. 1.8, а). Наиболее эффективными являются проходные конденсаторы, у которых один выводной конец присоединяют к корпусу, а другой проходит внутри конденсатора и является токоведущим проводником, присоединяемым к выходному зажиму машины. В ряде случаев применяют более сложные фильтры — Г-образный (рис. 1.8, б) и П-образный (рис. 1.8, в), состоящие из индуктивности L и емкости C . Такие фильтры пропускают во внешнюю цепь только постоянную составляющую тока и сильно ослабляют гармонические составляющие, создающие радиопомехи. Емкость помехоподавляющего конденсатора обычно подбирают опытным путем; она составляет 0,1 — 1 мкФ, а индуктивность дросселя фильтра - 50 — 500 мкГн.

§ 1.5. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Эксплуатационные свойства и надежность электрической машины во многом определяются технологией изготовления и качеством применяемых материалов. В электромашиностроении применяют различные магнитные, проводниковые и изоляционные материалы.

Магнитные материалы. Магнитопроводы электрических машин изготавливают из листовой электротехнической стали, стального литья и листовой углеродистой стали.

В зависимости от структурного состояния и способа прокатки электротехнические стали делят на горячекатаные и холоднокатаные. Горячекатаная сталь имеет поликристаллическую структуру, в которой кристаллы, имеющие форму куба, расположены хаотично, что приводит к практической изотропности свойств стали. Холоднокатаная сталь в результате холодной прокатки и отжига получает специальную структуру, при которой кристаллы ориентированы в определенном направлении.

Различают сталь с ребровой структурой, когда кристаллы ориентированы вдоль направления проката ребром куба, и сталь с кубической структурой - при ориентации кристаллов стороной куба. Сталь с ребровой структурой обладает ярко выраженной магнитной анизотропией. При этом вдоль направления прокатки обеспечивается наименьшее магнитное сопротивление, а в поперечном направлении или под углом к направлению прокатки - наибольшее. Поэтому при изготовлении магнитопроводов из такой стали необходимо, чтобы направление магнитного потока на всем его пути совпадало с направлением прокатки. Сталь с кубической структурой изотропна, т. е. имеет одинаково высокие магнитные свойства как вдоль, так и поперек прокатки.

Электротехническую сталь изготавливают различной толщины и выпускают в листах и рулонах. При частоте 50 Гц применяют сталь толщиной 0,28; 0,30; 0,35 и 0,5 мм; при частоте 400 Гц - 0,1 и 0,2 мм. Для трансформаторов, работающих на частотах свыше 2,5 кГц, используют сталь толщиной до 0,05 мм.

Главной легирующей присадкой электротехнической стали является кремний, наличие которого уменьшает магнитные потери в стали. Содержание кремния в стали составляет 0,4 - 4,8 % и чем оно выше, тем ниже потери. Однако добавка кремния повышает твердость и хрупкость стали, что затрудняет ее обработку. Поэтому высоколегированную сталь (с содержанием кремния 2,8 - 3,8 % и выше) применяют при изготовлении трансформаторов и крупных вращающихся машин. Для изготовления магнитопроводов малых машин, у которых в роторе и на статоре должны быть выштампованы пазы сравнительно сложной конфигурации, применяют сталь с содержанием кремния 0,4-1,9%.

Электротехническую сталь поставляют на электромашиностроительные заводы в виде листов, рулонов или резаной ленты, в основном в термически обработанном состоянии с электроизоляционным нагревостойким или ненагревостойким покрытием, а также без покрытия. В качестве изоляции используется слой оксидной пленки толщиной 3 - 5 мкм или лаковой пленки толщиной 15 - 20 мкм.

Различные марки электротехнической стали обозначают четырехзначными числами (например, 1211; 2013; 2212; 3413; 3416 и т. п.). Первая цифра означает принадлежность стали к тому или иному классу (1 — горячекатаная изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой). Вторая цифра означает содержание кремния (от 0,4 до 4,8 %); третья цифра — группа по основной нормируемой характеристике (удельным магнитным потерям при определенной индукции и частоте перемагничивания); четвертая цифра — порядковый номер типа стали.

Для изготовления магнитопроводов современных асинхронных двигателей с высотой оси вращения до 180 мм используют сталь марки 2013, при больших высотах вращения — марок 2212, 2312 и 2421. Статоры синхронных машин изготавливают из сталей тех же марок. Сталь 2013 обладает высокой магнитной проницаемостью и сравнительно низкими потерями на перемагничивание. После штамповки листы подвергают рекристаллизационному отжигу (для устранения ухудшения магнитных свойств стали в результате образования наклепа при технологических операциях) и оксидации для создания изоляционного слоя. Стали марок 2212, 2321 и 2411 имеют электроизоляционное покрытие и не требуют отжига. Применение этих сталей, имеющих низкие потери, повышает КПД и, кроме того, упрощает технологию изготовления, так как не требуется отжиг листов большого размера.

В машинах постоянного тока для сердечников якорей машин с высотой оси вращения до 200 мм применяют сталь марок 2013. Для снятия наклепа после штамповки сталь отжигают, а затем изолируют. При больших высотах вращения используют стали марок 2112, 2212, 2312, 2411.

При изготовлении магнитопроводов трансформаторов используют холоднокатаные анизотропные стали марок 3412 — 3413 с изоляционным покрытием; после штамповки сталь отжигают. Применение холоднокатаной анизотропной стали усложняет конструкцию и технологию изготовления магнитопроводов, так как при этом требуется исключить прохождение магнитного потока поперек прокатки или, по крайней мере, уменьшить длину участков, где это необходимо. По тем же причинам во вращающихся электрических машинах из-за более сложной конфигурации их магнитопроводов такая сталь находит ограниченное применение — только в очень крупных машинах для изготовления сегментов, из которых собирают сердечники статора и ротора (стали марок 3411—3413).

Полюсы машин постоянного тока и синхронных машин собирают из листов низкоуглеродистой конструкционной стали толщиной 1—2 мм или электротехнической стали 3411. Корпуса машин постоянного тока изготовляют путем сварки из листовой низколегированной магнитно-мягкой стали или стального литья, так как они являются частью магнитопровода. Стальное литье применяют также для изготовления станин и роторов синхронных машин. Валы машин выполняют из высокопрочных конструкционных сталей с добавкой хрома, никеля и т. п. Особенно сложно изготовить роторы турбогенераторов, в которых сталь одновременно должна обладать и высокой прочностью, и хорошей магнитной проницаемостью.

Проводниковые материалы. В электромашиностроении применяют медь и алюминий. Медь значительно дороже алюминия, однако ее используют для изготовления обмоток чаще, чем алюминий, так как она обладает более высокой электропроводностью (примерно в 1,6 раза), что позволяет сократить габариты машин. Для изготовления круглых и прямоугольных проводов обмоток электрических машин и трансформаторов применяют проводниковую медь высокой чистоты, получаемую в электролитических ваннах; она отличается весьма низким содержанием посторонних примесей (содержание меди 99,95 %).

Алюминиевые провода также применяют для изготовления обмоток вращающихся электрических машин, но только в том случае, когда эти обмотки имеют сравнительно малую тепловую нагрузку. Используют алюминий и для изготовления обмоток трансформаторов, где увеличение размера обмоток меньше влияет на увеличение габаритов и массы, чем во вращающихся электрических машинах.

В качестве токопроводящего материала контактных колец и коллектора кроме меди применяют бронзу и даже сталь (для контактных колец), так как для этих деталей важна не только электропроводность, но и высокая механическая прочность.

Изоляционные материалы. Основные требования, предъявляемые к изоляции,— нагревостойкость, высокая электрическая прочность, влагостойкость, хорошая теплопроводность, высокая механическая прочность и эластичность.

Нагревостойкость изоляции является основным требованием, определяющим надежность работы и срок службы электрической машины, который нормально составляет 15 — 20 лет. При нагреве изоляции возникают электрохимические и термические процессы, приводящие к ее старению, т. е. к потере изолирующих свойств и механической прочности.

Электроизоляционные материалы, применяемые в электромашиностроении, в зависимости от нагревостойкости подразделяют на семь классов: Y, A, E, B, F, H, C, характеристики которых приведены в табл. 1.2.

К классу У относят текстильные и бумажные материалы, изготовленные из хлопка, натурального шелка, целлюлозы и полиамидов (ленты, бумага, картон, фибра), древесины и пластмассы с органическими наполнителями.

В класс А входят материалы класса У, пропитанные изоляционным составом или погруженные в жидкие диэлектрики (натуральные смолы, масляные, асфальтовые, эфирцеллюлозные лаки, трансформаторное масло, термопластичные компаунды); лакоткани, изоляционные ленты, лакобумаги, электрокартон, гетинакс, текстолит, пропитанное дерево, древесные слоистые пластики, некоторые синтетические пленки, изоляция проводов типа ПБД, ПЭВЛО, ПЭЛШО и другие из хлопчатобумажной ткани, шелка и лавсана, эмалевая изоляция проводов типа ПЭЛ, ПЭМ, ПЭЛР и ПЭВД и др.

Класс Е составляют синтетические пленки и волокна, некоторые лакоткани на основе синтетических лаков, термореактивные синтетические смолы и компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые), изоляция проводов типа ПЛД, ПЭПЛО из лавсана, эмалевая изоляция проводов типа ПЭВТЛ, ПЭВТЛК и другие на основе полиуретановых и полиамидных смол.

В класс В включают материалы на основе слюды (миканиты, микаленты, слюдиниты, слюдопласты), стекловолокна (стеклоткани, стеклолакоткани) асбестовых волокон (пряжа, бумага, ткани) с бумажной, тканевой или органической подложкой; пленкостеклопласт «Изофлекс»; пластмассы с неорганическим наполнителем; слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов; термореактивные синтетические компаунды; эмалевая изоляция проводов типа ПЭТВ, ПЭТВД и другие на основе полиэфирных лаков и термопластических смол. Пропитывающими составами служат битумно-масляно-смоляные лаки на основе природных и синтетических смол.

Таблица 1.2

Класс изоляции	У	А	Е	В	Ф	Н	С
Предельная допустимая температура при длительной работе, °C	80	105	120	130	155	180	Более 180

Класс Ф содержит материалы, указанные в классе В,— из слюды, стекловолокна, асбеста, но без подложки или с неорганической подложкой; пленкостеклопласт «Имидофлекс», стекло-волокнистую и асбестовую изоляцию проводов типа ПСД, ПСДТ, а также эмалевую изоляцию проводов типа ПЭТ-155, ПЭТП-155, ПЭД на основе капрона. Пропитывающими составами служат термостойкие синтетические лаки и смолы.

Класс Н — это указанные в классе В материалы из слюды, стекловолокна и асбеста без подложки или с неорганической подложкой, кремнийорганические эластомеры, стекловолокнистая и асбестовая изоляция проводов типа ПСДК, ПСДКТ, эмалевая изоляция проводов типа

ПЭТ-200, ПЭТП-200 и другие на основе кремнийорганических лаков; пропитываемыми составами служат кремнийорганические лаки и смолы.

Класс С — слюда, стекло, стекловолокнистые материалы, электротехническая керамика, кварц, шифер, асбестоцемент, материалы из слюды без подложки или со стекловолокнистой подложкой, полиимидные и полифторэтиленовые пленки. Связующим составом служат кремнийорганические и элементоорганические лаки и смолы.

В настоящее время электрические машины с изоляцией класса А практически не изготавливают, а с изоляцией класса Б находят ограниченное применение — главным образом в машинах небольшой мощности. Применяют в основном изоляцию классов В и F, а в специальных машинах, работающих в тяжелых условиях (металлургия, горное оборудование, транспорт), — класса Н. В результате использования более нагревостойких материалов, улучшения свойств электротехнических сталей и улучшения конструкций за последние 60—70 лет удалось уменьшить массу электрических машин в 2,5 — 3 раза.

Наибольшей нагревостойкостью обладают стекловолокнистые и слюдяные материалы, содержащие кремнийорганические связующие и пропитываемые составы, эмалевая изоляция проводов на основе кремнийорганических лаков и синтетические пленки типа «Изофлекс», «Имидофлекс» и др. Они отличаются также высокой электрической и механической прочностью и влагостойкостью.

В электрических машинах широко используют обмоточные провода с эмалевой, волокнистой и комбинированной изоляцией. Класс нагревостойкости такой изоляции зависит от химического состава эмалевого лака, рода волокнистого материала и подклеиваемого состава. В машинах постоянного тока средней и большой мощности используют литую изоляцию типа «монолит». Изоляция представляет собой сочетание стеклоткани и слюдинита с термореактивным компаундом, который вводят в обмотку и изоляцию под вакуумом с последующей опрессовкой. Подобного же рода изоляцию с термореактивным компаундом применяют и в машинах переменного тока. В настоящее время стоимость изоляции составляет 30—70% от стоимости всех материалов, идущих на изготовление электрической машины.

В трансформаторах с масляным охлаждением широко используют провода с изоляцией класса А; применение в них изоляционных материалов с большой нагревостойкостью нецелесообразно, так как допустимая температура обмоток определяется температурой трансформаторного масла (105 °С), относящегося к классу А. В трансформаторах с воздушным охлаждением широко используют обмоточные провода более высоких классов нагревостойкости В, F.

В электрических машинах различают межвитковую и корпусную изоляцию. *Межвитковая изоляция* (между витками обмотки) обеспечивается

изоляцией самого проводника, наносимой на него в процессе изготовления на кабельных заводах или при изготовлении электрической машины. *Корпусная изоляция* отделяет проводники обмотки от корпуса электрической машины. Для нее используют различные прокладки, гильзы или ряд слоев изоляции, наносимой на соответствующую катушку до установки ее в машину.

Электрические щетки*. Электрический контакт со скользящими поверхностями (контактными кольцами и коллектором) осуществляется с помощью щеток, представляющих собой прямоугольные бруски сложного состава, выполненные на графитовой основе. Многочисленные типы щеток различают по твердости, коэффициенту трения и падению напряжения под щетками. Обычно щетки подбирают экспериментально. Основные правила, которыми руководствуются при выборе щеток, следующие:

1. для быстроходных машин постоянного тока применяют мягкие щетки со средним значением падения напряжения под ними (1,5-2,0 В);
2. для машин постоянного тока с затрудненной коммутацией — твердые щетки с повышенным падением напряжения под ними (2,4—3,5 В);
3. для контактных колец - металлографитные щетки с малым падением напряжения (0,1-0,5 В).