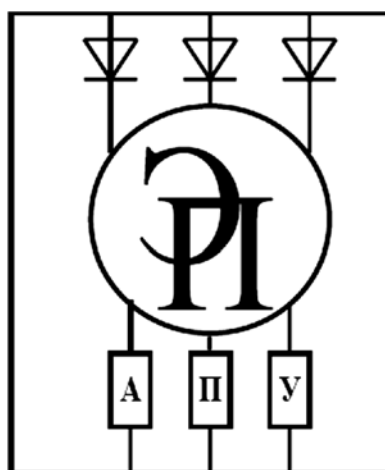


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

*Методические рекомендации к курсовому проектированию
для студентов специальности
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2022

УДК 621.313.01
ББК 31.261
Э45

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «13» января 2022 г.,
протокол № 7

Составитель ст. преподаватель В. А. Лапицкий

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях изложены необходимые сведения для выполнения курсового проекта по дисциплине «Электрические машины» студентами специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной и заочной форм обучения.

Учебно-методическое издание

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Ответственный за выпуск	Г. С. Леневский
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 115 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изделий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2022

Содержание

Введение.....	4
1 Пояснительная записка.....	5
2 Графическая часть проекта.....	5
3 Методические рекомендации	5
4 Оптимизация проектирования электрических машин.....	7
5 Теплоотдача в электрических машинах.....	8
6 Потери и КПД в электрических машинах.....	12
7 Узлы и отдельные детали асинхронных машин.....	15
Список литературы.....	27

Введение

Электрические машины в общем объеме производства электротехнической промышленности занимают основное место, поэтому их технико-экономические показатели и эксплуатационные свойства имеют важное значение для экономики страны.

Асинхронные машины применяются на практике главным образом как двигатели. Наибольшее распространение имеют трехфазные асинхронные двигатели. Они находят себе самое широкое применение на заводах, фабриках, в сельском хозяйстве, на строительных работах, для вспомогательных механизмов электрических станций.

Проектирование электрических машин – это искусство, соединяющее знание процессов электромеханического преобразования энергии с опытом, накопленным поколениями инженеров-электромехаников, умение применять вычислительную технику и талантом инженера, создающего новую или улучшающего уже выпускаемую машину.

При создании электрической машины рассчитываются размеры статора и ротора, выбираются типы обмоток, обмоточные провода, изоляция, материалы активных и конструктивных частей машины. Отдельные части машины должны быть так сконструированы и рассчитаны, чтобы при ее изготовлении трудоемкость и расход материалов были наименьшими, а при эксплуатации машина обладала высокой надежностью и наилучшими энергетическими показателями, при этом электрическая машина должна соответствовать условиям применения ее в электроприводе.

При проектировании электрических машин необходимо учитывать соответствие их технико-экономических показателей современному уровню при соблюдении требований государственных и отраслевых стандартов, а также назначение и условия эксплуатации, стоимость активных и конструктивных материалов, КПД, технологию производства, надежность в работе и патентную чистоту. Расчет и конструирование электрических машин неотделимы от технологии их изготовления. Поэтому при проектировании необходимо учитывать возможности электротехнических заводов, стремиться к максимальному снижению трудоемкости изготовления электрических машин.

Электрические машины массового производства выпускают единичными сериями. Проектирование новых серий – ответственная задача, решаемая с учетом новейших мировых достижений ведущих электротехнических фирм. Это накладывает особые требования на проектирование базовых машин серий и их модификаций. При проектировании необходимо учитывать возможные изменения стоимости материалов и электроэнергии, спрос на международном рынке, затраты на технологическое оборудование и другие факторы.

1 Пояснительная записка

При выполнении пояснительной записки обязательному рассмотрению и отражению подлежат следующие разделы.

Введение.

- 1 Описание конструкции и технологии сборки электродвигателя.
- 2 Выбор главных размеров электродвигателя.
- 3 Электромагнитный расчёт электродвигателя.
- 4 Расчёт рабочих характеристик электродвигателя.
- 5 Расчёт круговой диаграммы электродвигателя.
- 6 Расчёт пусковых характеристик электродвигателя.
- 7 Тепловой и вентиляционный расчёт электродвигателя.
- 8 Механический расчёт электродвигателя.
- 9 Экономический расчёт электродвигателя.

Заключение.

Список литературы.

Приложения.

Рекомендуемый объем пояснительной записки – 45–50 листов из расчета, что записка отпечатана на принтере, шрифт *Courier New 10*, допускается применение других шрифтов.

Пояснительная записка выполняется на листах формата А4, оформление – в соответствии с рекомендациями и требованиями ГОСТа.

2 Графическая часть проекта

Графическая часть проекта выполняется на двух листах формата А1.

На первом листе выполняется сборочный чертеж электродвигателя.

На втором листе выполняются следующие документы:

- 1) схема обмотки статора электродвигателя;
- 2) схема обмотки ротора электродвигателя (для АД с фазным ротором);
- 3) круговая диаграмма электродвигателя;
- 4) графики рабочих характеристик;
- 5) графики пусковых характеристик (для АД с короткозамкнутым ротором).

Для оптимального использования полезного места форматов допускается другое распределение документов. Оформление – в соответствии с рекомендациями и требованиями ГОСТа.

3 Методические рекомендации

Техническое задание на учебное проектирование асинхронного двигателя содержит номинальные данные проектируемой машины и указания о режиме ее работы, исполнении по способу монтажа, степени защиты от воздействия окружающей среды и системе охлаждения. Кроме того, могут быть заданы также дополнительные требова-

ния к проектируемому двигателю, например наименьшие допустимые значения кратности максимального и минимального моментов, а для двигателей с короткозамкнутыми роторами также предельные значения пускового тока и наименьшие значения пусковых моментов. В отношении требований, не оговоренных в задании, спроектированная машина должна удовлетворять соответствующим ГОСТам.

Проектирование новой машины начинают с выбора базовой модели, на которую ориентируются при проведении всех расчетов, начиная с выбора главных размеров, и при разработке конструкции отдельных узлов. За базовую обычно выбирается конструкция двигателя одной из новых серий, выпускаемых в настоящее время. Например, при проектировании асинхронных двигателей общего назначения малой и средней мощности (до 400 кВт) в качестве базовой модели следует выбирать конструкцию двигателей серии 4А или АИ и исполнения, предусмотренного в техническом задании.

В начальной стадии проектирования при выборе главных размеров и электромагнитных нагрузок необходимо учесть дополнительные требования технического задания. Если проектируемая машина должна иметь большой максимальный момент, то индуктивное сопротивление ее обмоток не должно быть большим, поэтому в такой машине нецелесообразно выбирать малое значение индукций, большую линейную нагрузку, узкие и глубокие пазы и т. п.

Требования к пусковым характеристикам с короткозамкнутым ротором следует обязательно учитывать при выборе конфигурации пазов ротора. Так, узкие и глубокие пазы с сужающейся верхней частью обеспечивают большое увеличение расчетного активного сопротивления ротора при пуске и большие пусковые моменты, но при таких пазах возрастает индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора и уменьшаются перегрузочная способность двигателя и коэффициент мощности при номинальном режиме.

Полностью учесть все требования технического задания к характеристикам двигателя при выборе размеров магнитопровода и обмотки машины, не ориентируясь на данные выпущенных машин, невозможно. Поэтому перед началом расчета следует детально изучить конструкцию базового двигателя, критически оценить принятые в ней соотношения размеров, уровни электромагнитных нагрузок и другие данные и лишь после этого приступить к расчету. Расчет асинхронных машин начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра статора D и расчетной длины магнитопровода l_δ . Размеры D и l_δ связаны с мощностью, угловой скоростью и электромагнитными нагрузками выражением машинной постоянной.

Расчет проводят, задаваясь на основании имеющихся рекомендаций значениями электромагнитных нагрузок (A и B_δ), коэффициентов (a_δ , k_B и $k_{\sigma\delta}$), и приближенно определяют расчетную мощность P' .

Остаются два неизвестных (D и l_δ), однозначное определение которых без дополнительных условий невозможно. Таким условием является более употребительное в расчетной практике отношение $\lambda = D/l_\delta$. Это отношение в значительной степени определяет экономические данные машин, а также оказывает влияние на характеристики и условия охлаждения двигателей.

У большинства выпускаемых асинхронных двигателей общего назначения отношение λ изменяется в достаточно узких пределах. Поэтому для определения D и l_δ можно предварительно выбрать то или иное отношение λ , характерное для заданного

исполнения и числа полюсов машины. Это позволит однозначно определить главные размеры. Однако внутренний диаметр статора непосредственно связан определенными размерными соотношениями с внешним диаметром статора D_a , в свою очередь, определяющим высоту оси вращения h , значение которой при проектировании новых двигателей может быть принято только из стандартного ряда высот, установленных ГОСТом.

Внешний диаметр статора должен также соответствовать определенным условиям, налагаемым требованиями раскроя листов электротехнической стали с наименьшими отходами при штамповке.

С учетом этих требований при ручном расчете асинхронного двигателя более целесообразным является выбор главных размеров, основанный на предварительном определении высоты оси вращения, увязке этого размера с внешним диаметром статора и последующем расчете внутреннего диаметра статора D .

Следует иметь в виду, что ГОСТ определяет стандартные высоты осей вращения независимо от назначения и конструктивного исполнения асинхронных двигателей, поэтому высота оси вращения любого проектируемого двигателя должна быть равна одному из этих значений [2].

4 Оптимизация проектирования электрических машин

Критерий оптимизации электрических машин определяется, как правило, минимумом суммарных затрат, т. е. минимумом стоимости материалов, затрат на изготовление и эксплуатацию. Стоимость эксплуатации зависит от КПД, коэффициента мощности, качества машины, ремонтоспособности и ряда других факторов.

Выбрать оптимальный вариант производства электрической машины можно, сопоставив многие варианты расчета, поэтому без вычислительных машин не обходится ни один серьезный расчет электрических машин. В настоящее время ЭВМ применяют для выполнения полного оптимизационного расчета электрической машины, ведутся работы по созданию системы автоматизированного проектирования электрических машин, которая должна не только выполнять расчет машины, но и выдавать рабочие чертежи. Предполагается, что в будущем автоматизированные системы проектирования будут выполнять работу от приема заказа на проектирование до испытания без ее изготовления (прогнозирование геометрии, надежности и характеристик).

Сопоставление программ расчетов, накопление банков данных, решение вопросов создания автоматизированной системы проектирования электрических машин – одни из трудных и важных задач электротехнической науки. Но прежде чем заниматься этими вопросами, необходимо научиться проектировать машину. Для этого надо уметь проводить электромагнитный, тепловой, механический и экономический расчеты машины.

Проектирование электрической машины сводится к многократному расчету зависимостей между основными показателями, заданных в виде системы формул, эмпирических коэффициентов, графических зависимостей, которые можно рассматривать как уравнения проектирования.

Оптимальные варианты электрической машины выбираются на основании широкого применения вычислительных машин, опыта и интуиции проектировщика.

При оптимизации электрических машин важное значение имеет выбор критерия оптимизации. Выбор критерия оптимизации зависит от назначения электрической машины и предъявляемых к ней требований. Для специальных машин целесообразно выбирать минимум массы или минимальные габариты. Для электрической машины общего назначения в качестве критерия оптимизации принимают минимум приведенных затрат. Этот критерий широко применяется во многих странах. Приведенные затраты на электрическую машину в процессе производства и эксплуатации являются обобщающим экономическим показателем, включающим основные экономические эквиваленты основных технических характеристик. Нельзя найти универсальный критерий оптимальности. Действительно, минимальная масса машины обуславливает снижение энергетических показателей и ухудшение надежности. Наиболее очевидны противоречия между статическими и динамическими характеристиками. Для уменьшения времени пуска асинхронного двигателя надо увеличивать активное сопротивление обмотки ротора, что вызывает ухудшение энергетических показателей в установленном режиме [3].

5 Теплоотдача в электрических машинах

Тепловая энергия, выделяемая на элементах машин при ее работе, может вызывать недопустимое повышение температуры активных и конструктивных элементов машины, снижение электрической и механической прочности изоляции обмоток, уменьшение времени безотказной работы машины. Поэтому определение тепловых потоков, расчет изменения температуры в пространстве внутреннего объема и на поверхностях охлаждения машины являются важными разделами проектирования электрической машины. На основе этого расчета оценивается тепловое состояние машины, выбираются такие тепловые и вентиляционные схемы и способы ее охлаждения, при которых превышение температуры частей электрической машины не превосходит пределов допускаемых значений, установленных ГОСТ 183–74.

Температура частей электрической машины зависит от температуры охлаждающей среды. В связи с неизбежными колебаниями температуры охлаждающей среды принято тепловую напряженность частей электрической машины характеризовать превышением их температуры над температурой охлаждающей среды.

Номинальные данные электрической машины (мощность, напряжение, ток, частота вращения, коэффициент мощности, КПД и др.) обычно относятся к ра-

боте машины на высоте до 1000 м над уровнем моря при температуре окружающей среды до +40 °С и охлаждающей воды до +30 °С, но не выше +33 °С, если в стандартах или технических условиях на проектируемую машину не указаны другие требования [4].

При длительной работе электрической машины влияние на тепловой режим и нагрев ее отдельных частей оказывают изменения напряжения сети, частоты, нагрузки и другие факторы.

Согласно ГОСТ 183–74 на общие технические требования к электрическим машинам установлены восемь номинальных режимов работы, из которых наиболее часто встречаются следующие:

- 1) продолжительный (условное обозначение S1);
- 2) кратковременный (S2) с длительностью рабочего периода 10, 30, 60 и 90 мин;
- 3) повторно-кратковременный (S3) с относительной продолжительностью включения ПВ-15, 25, 40 и 60 % длительности одного цикла работы, равного 10 мин;
- 4) перемежающийся с чередованием неизменной номинальной нагрузки и холостого хода (S6) без выключения машины с продолжительностью нагрузки ПН-15, 25, 40 и 60 % длительности одного цикла работы, равного 10 мин.

Предельная допускаемая температура для какой-либо части электрической машины определяется как сумма допускаемого превышения температуры и предельной допускаемой температуры охлаждающей среды +40 °С, принятой для электрических машин общего назначения.

Предельная допускаемая температура подшипников не должна превышать следующих значений: для подшипников скольжения – 80 °С (температура масла не должна быть при этом выше 65 °С), для подшипников качения – 100 °С.

Измерение температуры отдельных частей электрической машины при тепловых испытаниях осуществляют методами термометра, сопротивления (только для обмоток) и температурных индикаторов.

При измерениях методом термометра согласно ГОСТ 11828–86 температура фиксируется термометром, прикладываемым к доступным местам.

Согласно ГОСТ 20459–87 обозначение способов охлаждения электрических машин, принятое в технической документации всех видов, состоит из латинских букв IC – первых букв английских слов International Cooling и следующих за ними буквы, характеризующей вид хладагента (А – воздух, Н – водород, N – азот, С – диоксид углерода, Fr – фреон, W – вода, U – масло, Кг – керосин), и двух цифр: первая условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая – способ перемещения хладагента.

Условное обозначение устройства цепи циркуляции содержит 10 цифр (от 0 до 9):

- 0 – свободная циркуляция наружного воздуха;
- 1–3 – охлаждение при помощи проводящей (1), отводящей (2) или обеих труб (3);
- 4 – охлаждение наружной поверхности с использованием окружающей среды;
- 5, 6 – охлаждение окружающей средой при помощи встроенного (5) или пристроенного (6) теплообменника;

7, 8 – охлаждение при помощи встроенного (7) или пристроенного (8) охладителя;

9 – охлаждение при помощи охладителя, установленного отдельно от машины.

Способы перемещения хладагента обозначаются второй цифрой:

0 – свободная конвекция;

1 – самовентиляция;

2, 3 – перемещение хладагента встроенным или пристроенным устройством, установленным непосредственно на валу машины (3) или связанным с валом через зубчатую или ременную передачу (2);

5, 6 – то же, при независимом устройстве;

7 – перемещение хладагента осуществляется отдельным устройством [8].

Если в машинах применяют двухконтурные системы охлаждения, то способы охлаждения обозначают, начиная с цепи более низкой температуры. Например, закрытая машина с водородным охлаждением и встроенным водяным охладителем, циркуляция воды в охладителе которой осуществляется отдельным и независимым от охлаждаемой машины насосом или от водопроводной сети, имеет обозначение IC37H71. Закрытая машина, которая имеет обмотку статора с непосредственным водяным охлаждением и обмотку ротора, охлаждаемую водородом, и циркуляция воды в обмотке статора которой осуществляется отдельным насосом, обозначается так: ICW87 – обмотка статора, H71 – обмотка ротора.

Самой простой схемой охлаждения, которая применяется преимущественно в машинах мощностью до 1 кВт, является схема с естественной вентиляцией без применения особых средств для повышения интенсивности охлаждения.

Большинство электрических машин общего назначения, за исключением турбо- и гидрогенераторов, а также синхронных компенсаторов охлаждаются воздухом и имеют принудительную схему вентиляции.

В случае принудительной вентиляции цепь охлаждения машины может быть:

1) разомкнутой – воздух поступает из окружающей среды, проходит каналы тракта охлаждения машины и выбрасывается снова в окружающую среду;

2) замкнутой – поток охлаждающего воздуха не связан с окружающей средой, а циркулирует по замкнутому контуру, включающему в себя и внутренний объем закрытой машины. При замкнутой вентиляции охлаждающий воздух отдает свою теплоту либо воде в специальном газоохладителе, либо корпусу машины через его внутреннюю поверхность, как это осуществляется, например, в асинхронных двигателях закрытого исполнения, обдуваемых наружным вентилятором.

В зависимости от направления движения воздуха (газа) внутри машины различают аксиальную, аксиально-радиальную и радиальную схемы вентиляции.

Если электрическая машина имеет схему самовентиляции, то напор в вентиляционной системе создается вентилятором, установленным на валу машины. Эта схема вентиляции подразделяется на два класса: нагнетательную и вытяжную. При нагнетательной схеме вентиляции охлажденный газ под воздействием избыточного давления, создаваемого нагнетателем, поступает в вентиляционные

каналы активной зоны машины. При вытяжной схеме вентиляции охлаждающий газ поступает в вентиляционные каналы машины под действием разряжения, создаваемого вентилятором.

Вытяжная вентиляция обладает тем преимуществом, что газ поступает в машину без предварительного его подогрева вентилятором, что несколько снижает превышение температуры обмоток.

В практике электромашиностроения применяют как нагнетательные, так и вытяжные схемы вентиляции, которые по числу струй бывают одноструйными и многоструйными. При многоструйной схеме вентиляции каналы каждой струи имеют независимые выходы подогретого воздуха в сборную зону перед нагнетателем.

Схему принудительной вентиляции с помощью независимого вентилятора применяют в машинах с широким диапазоном регулирования частоты вращения, когда система самовентиляции при малых частотах вращения ротора не является эффективной. По этой схеме выполняют отдельные модификации асинхронных двигателей серии 4А.

По способу отвода тепла от тепловыделяющих элементов электрических машин различают схемы косвенного и непосредственного охлаждения: в первом случае отвод тепла осуществляется с открытых поверхностей активных частей машины, во втором – хладагент по специальным каналам подводится к проводникам обмоток машины, отбирая тепло непосредственно от обмоток.

Все электрические машины общего назначения выполняются по системе косвенного воздушного охлаждения.

Особенности конструктивного исполнения отдельных типов машин с косвенным воздушным охлаждением определили и их схему вентиляции: крупные машины постоянного тока и синхронные двигатели выполняются преимущественно с радиальной схемой вентиляции. Асинхронные машины большой мощности имеют радиальную, аксиальную и аксиально-радиальную схемы.

Система непосредственного водяного охлаждения обычно сочетается с системой косвенного газового охлаждения активных частей машины [8].

Основными источниками выделения теплоты в электрической машине являются обмотка, элементы магнитопровода и конструктивные элементы, в которых возникают потери от перемагничивания. Тепло выделяется и в скользящем контакте. Механические потери, в том числе и вентиляционные, также увеличивают нагрев машины.

На пути движения тепловых потоков от источников тепла происходит перепад температуры в активных частях машины, в изоляции и между охлаждающими поверхностями и охлаждающей средой. В тепловом расчете определяются все внутренние перепады и превышения температуры внешней поверхности охлаждаемых частей электрической машины над температурой охлаждающего воздуха.

В практических расчетах часто ограничиваются определением среднего превышения температуры обмоток, т. е. допускают, что температура обмоток в стали пакетов статора (ротора) постоянна.

Для определения полного превышения температуры обмоток необходимо учесть подогрев охлаждающей среды, которая, поступая в машину, воспринимает тепло от нагретых частей.

Повышение технического уровня новых серий электрических машин ставит задачу поиска оптимальных вариантов, основанных на весьма точных методах электромагнитного и теплового расчетов разрабатываемой машины. Поэтому с развитием электромашиностроения совершенствуются и развиваются методы анализа и расчета тепловых процессов в машинах, более точно рассчитываются превышения температуры всех элементов машины.

Наличие воздушных прослоек в слоистой изоляции резко снижает результирующую теплопроводность изоляции. Для улучшения теплопроводности многослойной изоляции обмоток электрических машин и повышения ее электрической прочности предусматривают компаундирование обмоток специальными лаками и компаундами. Поэтому при выполнении тепловых расчетов электрических машин обычно используют эквивалентные значения теплопроводности, полученные экспериментальным путем для соответствующего класса изоляции.

6 Потери и КПД в электрических машинах

В электромеханических преобразователях (электрических машинах) электромеханическое преобразование энергии происходит с обязательным преобразованием части электрической энергии (режим двигателя) или механической (режим генератора) в тепло [9]. Так как эта часть энергии «теряется» в процессе преобразования, ее принято называть потерями, а отношение полезной работы к затрачиваемой – коэффициентом полезного действия (КПД).

КПД – основной показатель энергетических характеристик электрических машин и его расчет имеет важное значение при их проектировании. Чтобы определить КПД машины, надо, по возможности, точно рассчитать потери. Потери в отдельных ее частях необходимо также знать для определения в них температуры, что влияет на расчет размеров и геометрию основных конструктивных узлов электрических машин. Потери в электрических машинах делятся на основные и добавочные.

К основным потерям относятся электрические потери (потери в меди), магнитные (потери в стали) и механические потери. Электрические потери сосредоточены в обмотках электрических машин переменного тока, а в машинах постоянного тока к ним добавляются еще и потери на коллекторе. Магнитные потери возникают там, где замыкается переменный магнитный поток. Механические потери связаны с потерями в подшипниках, с трением вращающихся частей машины о воздух и в скользящих контактах. К механическим потерям относятся также вентиляционные потери, которые расходуются на охлаждение машины.

К добавочным потерям относятся потери, которые не были учтены при расчете основных потерь.

Магнитные потери и механические потери в большинстве машин не зависят от нагрузки и они являются постоянными потерями. Обычно это потери холостого хода. Электрические потери зависят от нагрузки, поэтому их относят к переменным потерям [9].

Расчету потерь при проектировании уделяется большое внимание, т. к. от этого зависят основные размеры и геометрия электрической машины.

Электрические потери возникают в проводниках обмоток, соединительных шинах и проводах, в переходных контактах щетки – коллектор или щетки – контактные кольца.

Магнитные потери, или, как их чаще называют, потери в стали ($P_{ст}$), возникают в участках магнитопровода с переменным магнитным потоком: в статорах асинхронных и синхронных машин и якорях машин постоянного тока. В роторах синхронных машин, полюсах и станине машин постоянного тока поток постоянный и основные потери в стали отсутствуют. В роторах асинхронных машин частота тока и потока в номинальном режиме небольшая, поэтому потерями в стали ротора пренебрегают [9].

Основные потери в стали состоят из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи. Они зависят от марки стали, толщины листов магнитопровода, частоты перемагничивания и индукции. На них оказывают влияние также различные технологические факторы. В процессе штамповки листов магнитопровода образуется наклеп, который изменяет структуру стали по кромкам зубцов и увеличивает потери на гистерезис. Потери на вихревые токи возрастают в результате замыканий части листов магнитопровода между собой, возникающих из-за заусенцев, которые образуются при опиловке пазов, при забивке пазовых клиньев, из-за чрезмерной опрессовки магнитопровода и ряда других причин.

Точных аналитических формул для расчета основных потерь в стали, учитывающих влияние вышеприведенных факторов, не существует. Потери в стали рассчитывают по формулам, основанным на результатах многолетних теоретических и экспериментальных исследований.

Основные потери в стали определяют как сумму потерь в зубцах и в ярме магнитопровода.

Механические потери в электрических машинах состоят из потерь на трение в подшипниках, на трение вращающихся частей машины о воздух или газ и потерь на трение в скользящих контактах щетки – коллектор или щетки – контактные кольца. К вентиляционным потерям относят затраты мощности на циркуляцию охлаждающего воздуха или газа.

В машинах с самовентиляцией на вентиляционные потери расходуется часть подводимой к машине мощности. В машинах с принудительной вентиляцией или с жидкостным охлаждением для циркуляции охлаждающего агента – воздуха, газа или жидкости – устанавливают вентиляторы или компрессоры с независимым приводом. Потребляемая их двигателями мощность учитывается при расчете КПД основной машины как потери на вентиляцию.

Расчетные формулы, позволяющие найти каждую из составляющих этих видов потерь, основаны на экспериментальных данных и отражают зависимость потерь от конструкции машины, ее размеров, частоты вращения и от ряда других

факторов. При проектировании машин, конструкция которых несущественно отличается от серийных, в расчете можно использовать эмпирические формулы, дающие непосредственно сумму вентиляционных и механических потерь (за исключением потерь на трение в скользящих контактах).

Расчет механических и вентиляционных потерь $P_{\text{мех}}$ можно выполнить лишь после завершения проектирования и определения размеров всех деталей машины. Во время учебного проектирования при разработке конструкции машины следует иметь в виду качественную зависимость этого вида потерь от размерных соотношений машины. Потери на трение и вентиляцию резко увеличиваются в машинах с большим диаметром ротора и большой частотой вращения. Так, в большинстве машин эти потери пропорциональны квадрату частоты вращения и квадрату наружного диаметра статора.

Добавочные потери, как правило, меньше основных потерь, рассмотренных в предыдущих параграфах. Некоторые виды добавочных потерь возникают при холостом ходе и не изменяются при нагрузке машины, другие появляются только с увеличением тока нагрузки. В зависимости от этого первый вид потерь называют добавочными потерями холостого хода, а второй – добавочными потерями при нагрузке.

К добавочным потерям холостого хода относят поверхностные $P_{\text{пов}}$ и пульсационные $P_{\text{пуль}}$ потери.

Поверхностные потери возникают из-за пульсаций индукции в воздушном зазоре. При работе машины индукция в каждой отдельно взятой точке, расположенной на одной из поверхностей магнитопровода, обращенных к зазору, будет изменяться от наибольшего значения (когда против нее на противоположной стороне зазора находится коронка зубца) до наименьшего (когда на другой стороне располагается паз).

Частота таких пульсаций индукции определяется числом зубцов и частотой вращения, т. е. зубцовой частотой, измеряемой в герцах.

Вызванная этими пульсациями ЭДС создает в тонком поверхностном слое головок зубцов и полюсных наконечников вихревые токи, потери от которых и называют поверхностными.

Таким образом, наличие зубцов на статоре определяет возникновение поверхностных потерь в роторе, и, наоборот, зубцы ротора вызывают поверхностные потери на статоре. Поверхностные потери возникают во всех машинах, имеющих зубчатую поверхность на одной или на двух сторонах воздушного зазора. Эти потери имеют место в статорах и роторах асинхронных машин.

Поля, созданные высшими гармониками МДС обмоток, и зубцовые гармоники поля с ростом нагрузки машины увеличивают поверхностные и пульсационные потери. Поверхностные и пульсационные потери возникают во всех машинах, имеющих пазы, открытые в воздушный зазор, хотя бы на одной из его поверхностей. При закрытых пазах в магнитопроводе, расположенном на противоположной им стороне зазора, поверхностные и пульсационные потери не возникают. Например, эти потери отсутствуют на поверхности и в зубцах статора асинхронного двигателя, если его ротор выполнен с закрытыми пазами.

Относительная величина поверхностных $P_{\text{пов}}$ и пульсационных $P_{\text{пул}}$ потерь в общей сумме резко возрастает в машинах с большим числом пазов, с большой частотой вращения, а также при увеличении ширины шлица паза и уменьшении воздушного зазора. Это объясняется тем, что в первом случае возрастает частота, а во втором – амплитуда пульсаций индукции в воздушном зазоре и в зубцах магнитопровода. В двухполюсных асинхронных двигателях чрезмерное уменьшение воздушного зазора приводит к значительному увеличению поверхностных $P_{\text{пов}}$ и пульсационных $P_{\text{пул}}$ потерь, что может служить причиной возрастания суммарных потерь и уменьшения КПД двигателя.

Добавочные потери при нагрузке возникают как в проводниках обмоток, так и в стали на отдельных участках магнитопровода. Ток нагрузки создает потоки рассеяния, сцепленные с проводниками обмоток. В результате этого в проводниках наводятся вихревые токи, вызывающие добавочные потери, не учтенные ранее в расчете.

Расчет отдельных добавочных потерь при нагрузке проводят обычно лишь для машин большой мощности. Для машин общего назначения эти потери учитывают приближенно. Согласно ГОСТ 11828–86 добавочные потери при нагрузке для асинхронных машин при расчете берут равными 0,5 % потребляемой номинальной мощности.

КПД электрической машины изменяется с изменением ее нагрузки. При увеличении нагрузки от холостого хода до номинальной КПД сначала быстро увеличивается, достигает максимального значения, после чего несколько снижается.

7 Узлы и отдельные детали асинхронных машин

Наряду с электромагнитными и тепловыми расчетами, механические расчеты во многом определяют энергетические, массогабаритные и виброакустические показатели, а также надежность и срок службы электрических машин. Поэтому расчеты узлов и отдельных деталей при проектировании электрических машин имеют важное значение.

Магнитопроводы статора машин переменного тока общего назначения выполняют шихтованными из электротехнической стали толщиной 0,35...0,55 мм. При внешнем диаметре магнитопровода до 990 мм он выполняется из целых листов, а при больших диаметрах собирают из отдельных сегментов. По внутренней поверхности магнитопровода штампуют пазы требуемой формы для размещения в них обмотки статора.

Так как в размерах отдельных зубцов имеется разброс, обусловленный допусками при изготовлении штампа, то при шихтовке магнитопровода листы укладываются в одно и то же положение относительно друг друга по шихтовочному знаку, который вырубает на внешней поверхности. Для изоляции листов друг от друга их после снятия заусенцев лакируют. Если листы изготовляют из стали 2013, то их подвергают термообработке, в результате которой уменьшаются потери в стали и на поверхности создается оксидный изоляционный слой.

При большой длине магнитопровода его делят на пакеты, между которыми выполняют вентиляционные радиальные каналы шириной 10 мм путем приварки к крайним листам пакета распорок, имеющих чаще всего двутавровое сечение.

При внешнем диаметре до 493 мм магнитопровод набирают из целых листов, насаживая их на цилиндрическую оправку диаметром, равным внутреннему диаметру статора. Для предотвращения деформации (распушения) относительно тонких зубцов торцевые листы магнитопровода штампуют из более толстых листов стали или их попарно сваривают точечной сваркой. Собранный таким образом магнитопровод прессуют и после этого скрепляют по внешнему диаметру П-образными скобами. Скобы приваривают к торцам и к внешней поверхности магнитопровода или, как это сделано у машин серии 4А, укладывают в специальные канавки в форме «ласточкина хвоста» на внешней поверхности магнитопровода. После укладки обмотки и пропитки ее лаком магнитопровод запрессовывают в станину и закрепляют стопорными винтами.

Иногда в асинхронных машинах небольших габаритов ($h < 63$ мм) спрессованный магнитопровод покрывают тонкостенной оболочкой из алюминия или алюминиевого сплава. Эта оболочка охватывает внешнюю и частично торцевые поверхности магнитопровода. Она скрепляет пакет и заменяет собой станину. Оболочка выполняется в формах на специальных машинах для литья под давлением. Такое изготовление статора экономически более выгодно по сравнению с изготовлением его с чугуновой станиной.

При внешних диаметрах магнитопровода 520...990 мм он собирается из листов, которые укладываются в расточенный корпус или на обработанные ребра.

Магнитопровод скреплен двумя нажимными шайбами (кольцами). Для создания осевого сжатия у одного края ребра имеется выступ, а у другого края – канавка, в которую вставляется запорная шпонка. Нажимная шайба передает усилие сжатия на магнитопровод через нажимные пальцы – стальные пластинки, приваренные к крайним листам.

При внешних диаметрах магнитопровода более 990 мм он собирается из сегментов. Различают слоевую шихтовку, при которой каждый слой состоит из целого числа сегментов, и винтовую, при которой в каждом слое последний сегмент перекрывает предыдущий.

Для шихтовки магнитопровода из сегментов существуют несколько способов крепления листов в корпусе. В машинах общего назначения наибольшее распространение находит способ крепления на сборочных шпильках, которые одновременно являются и стяжными. Базирование магнитопровода в радиальном направлении происходит на ребрах станины.

При механическом расчете магнитопровода проверяют прочность стягивающих его узлов.

При запрессовке магнитопровода шайбами проверяют прочность этих шайб, нажимных пальцев и шпонки. При стяжке магнитопровода шпильками выбирают их размер и число.

Станины статоров электрических машин выполняют литыми, сварными или из труб. В машинах переменного тока станина является каркасом, в котором располагается магнитопровод статора с обмоткой. Конструкция станины зависит от

степени защиты машины. Для асинхронных двигателей закрытого исполнения (степень защиты IP44) применяют литые чугунные станины цилиндрической формы.

Для улучшения охлаждения машины на внешней поверхности станины отливают продольные ребра (при $h < 355$ мм) или приваривают распределенный воздухоохладитель, состоящий из двух-трех рядов стальных трубок диаметром 40 мм (при $h > 400$ мм). Между ребрами или через трубки воздухоохладителя наружным вентилятором, расположенным на валу машины, прогоняется охлаждающий воздух. Высоту ребер h_r выбирают равной $(0,15 \dots 0,2)h$. Число ребер, приходящихся на четверть поверхности станины, выбирают от 8 до 12.

Внутренняя поверхность станины у машин небольшой мощности гладкая, а у более крупных машин (при $h > 400$ мм) для закрепления магнитопровода на ней предусматривают продольные ребра.

У двигателей защищенного исполнения (степень защиты IP23) станины выполняют литыми с гладкой внешней поверхностью, а на внутренней поверхности имеются 4–6 ребер для посадки магнитопровода. В боковых частях станины предусматривают отверстия для выхода охлаждающего воздуха. Отверстия закрывают жалюзи, которые штампуют из стали или выполняют из алюминиевых сплавов.

Для машин переменного тока большой мощности (больше сотен киловатт) чаще всего применяют сварные станины. Сварные станины выполняют в виде кольцевой коробки П-образного сечения и состоят они из ряда продольных балок, приваренных к боковым кольцам. В машинах общего назначения чаще всего применяют станины с «глухой» наружной стенкой. Одна из торцевых наружных стенок такой станины имеет отверстие, диаметр которого меньше внешнего диаметра магнитопровода («глухая» стенка). К этой стенке приваривают нажимные пальцы. Вторая торцевая стенка открытая, и через нее ведут шихтовку магнитопровода. К этой стенке после прессовки магнитопровода приваривают нажимное кольцо с пальцами.

В целях уменьшения размеров подшипниковых щитов и повышения их жесткости иногда увеличивают длину станины. Развита в сторону подшипниковых щитов часть станины может иметь меньшую толщину. Толщину станины определяют из электромагнитного расчета. Полученные размеры станины обеспечивают ее достаточную прочность и жесткость. В машинах постоянного тока станины как при защищенном (степень защиты IP22), так и при закрытом исполнении (степень защиты IP44) имеют гладкую внешнюю поверхность. При высотах оси вращения до 200 мм станины выполняют из цельнотянутых стальных труб, а при больших высотах оси вращения сваривают из толстолистовой стали, свернутой в трубу. Сварной шов целесообразно располагать по линии главных полюсов, чтобы исключить влияние этого шва на распределение магнитного потока. В удлиненных станинах предусматривают люки для обслуживания коллектора и подачи охлаждающего воздуха.

Для улучшения работы двигателей постоянного тока при питании их от тиристорных преобразователей целесообразно магнитопровод статора выполнять

шихтованным из листов электротехнической стали толщиной 0,5...1 мм, а затем запрессовывать его в литой корпус.

При проектировании станины электрической машины в нижней ее части должны быть предусмотрены лапы, с помощью которых она крепится к фундаменту. Расположение лап на станине должно быть таким, чтобы можно было свободно вставлять в их отверстия крепящие машину болты, а в машинах постоянного тока – еще и не затруднять установку и выем болтов, крепящих полюсы. Опорные лапы либо отливают вместе со станиной, либо изготавливают отдельно. Кроме того, на станине должны быть окна и приваренные или отлитые основания для размещения коробки вводных проводов.

В верхней части станины делают приливы или приваривают бобышки, в которых высверливают отверстия и нарезают резьбу для рым-болтов. В малых машинах делают один рым-болт, а у более крупных – два. При массе машины менее 30 кг рым-болт отсутствует. Станины должны иметь зажим для заземления.

При внешнем диаметре станины менее 1...1,5 м к ее торцам болтами привертывают подшипниковые щиты, для чего на торцах должны быть выполнены кольцевые заточки для посадки и предусмотрены приливы или ушки с нарезанными отверстиями для крепления щитов. При больших диаметрах станин применяют стояковые подшипники.

В последнее время получили распространение станины прямоугольной формы. Машина такой формы лучше вписывается в интерьер производственных помещений, гармонируя с прямыми линиями колонн, окон, станков и т. п. Кроме того, при прямоугольной форме станины удастся лучше использовать ее внутренний объем и за счет этого уменьшить размеры машины.

В новой серии РА для машин с высотой оси вращения 132 мм используют алюминиевые станины, получаемые экструзией.

Основной конструкцией асинхронных двигателей являются серии 4АМ и АИ, которые отличаются друг от друга выполнением корпуса и подшипниковых узлов. Активные части в этих сериях идентичны.

Станины имеют горизонтально-вертикальное оребрение и улучшенную эстетичность формы [11].

Электрические машины общего назначения выполняют преимущественно с горизонтальным расположением вала. В этом случае вал несет на себе всю массу вращающихся частей, через него передается вращающий момент машины. При сочленении машины с исполнительным механизмом (для двигателя) или с приводным двигателем (для генератора) через ременную или зубчатую передачу, а также и через муфту на вал действуют дополнительные изгибающие силы. Кроме того, на вал могут действовать силы одностороннего магнитного притяжения, вызванные магнитной несимметрией, усилия, появляющиеся из-за наличия небаланса вращающихся частей, а также усилия, возникающие при появлении крутильных колебаний.

Правильно сконструированный вал должен быть достаточно прочным, чтобы выдержать все действующие на него нагрузки без появления остаточных деформаций. Вал должен также иметь достаточную жесткость, чтобы при работе машины ротор не задевал о статор. Критическая частота вращения вала должна

быть значительно больше рабочих частот вращения машины. При критической частоте вращения вынуждающая сила небаланса имеет частоту, равную частоте собственных поперечных колебаний вала (т. е. наступает явление резонанса), при которой резко увеличиваются прогиб вала и вибрация машины.

Валы изготавливают из углеродистых сталей, преимущественно из стали марки 45. Для повышения механических свойств сталей их подвергают термической обработке.

Размеры вала определяют при разработке конструкции. Валы имеют ступенчатую форму с большим диаметром в месте посадки магнитопровода ротора. Число ступеней вала зависит от количества узлов машины, размещаемых на нем (магнитопровод, коллектор, подшипники, вентилятор, контактные кольца и т. д.). При переходе с одного диаметра вала на другой для предупреждения недопустимой концентрации напряжений в местах переходов должны быть предусмотрены закругления (галтели) максимально возможного радиуса. Отношение радиуса галтели к диаметру вала должно быть больше 0,05. По этой же причине не следует применять отношение диаметров соседних ступеней вала более 1,3. Иногда для фиксации положения пакета магнитопровода ротора на валу предусматривается упорный буртик.

Окончательные размеры вала устанавливаются после его расчетов на жесткость и прочность. Свободный конец вала имеет цилиндрическую или коническую форму. Широкое применение имеют валы с цилиндрическим концом. На этот конец насаживают полумуфту, или шкив, или шестерню, которые закрепляют с помощью шпонки. На валу имеется еще ряд шпонок для закрепления различных узлов, размещаемых на валу. В цепях упрощения обработки вала ширину всех шпонок желательно брать такой же, как и у свободного конца.

Размеры свободного конца вала должны быть выбраны в соответствии с ГОСТ 18709–73 и ГОСТ 20839–75. Концы валов предусматриваются двух исполнений: длинные и короткие.

Шпонки для свободного конца вала выбирают по стандартам.

При конструировании вала следует также согласовать размеры шеек вала, на которых размещают подшипники, с размерами выбранных подшипников.

При расчете прогиба вала принимают, что вся масса активной стали ротора с обмоткой и участка вала под ними приложена в виде сосредоточенной силы G_p посередине длины магнитопровода. Массу указанных частей определяют по данным электромагнитного расчета. Массой остальных частей вала можно пренебречь. Принимают, что ротор асинхронного двигателя или якорь машины постоянного тока представляют собой сплошной цилиндр с плотностью 8300 кг/м^3 .

Прогиб вала под действием силы G_p на участке, соответствующем середине магнитопровода, не должен превышать 10 % у асинхронных двигателей от величины воздушного зазора.

Рабочая частота вращения ротора должна отличаться от критической не менее чем на 30 %.

Вал электрических машин передает вращающий момент и, кроме того, испытывает изгибающие усилия от сил тяжести, магнитного притяжения и от поперечных сил на свободном конце. В результате этого вал испытывает совместное действие напряжения изгиба и напряжения кручения.

Для центровки относительно станины в верхней торцевой части щита делают кольцевой буртик. Если буртик подшипникового щита входит в расточку корпуса, то такое сочленение образует внутренний замок. При расположении буртика на наружной поверхности станины замок называется наружным.

Подшипниковые щиты прикрепляются к корпусу статора при помощи болтов или шпилек. Щиты и корпус статора обычно выполняются литыми из чугуна. Для малых машин их часто выполняют литыми из сплава с большим содержанием алюминия, что уменьшает вес машины.

В машинах защищенного исполнения в щитах выполняют окна для прохождения охлаждающего воздуха. Если подшипниковый щит охватывает коллектор или контактные кольца, то для доступа к щеткам в верхней его части делают проемы, закрываемые крышками. Для закрепления щита в станке при его обработке на нем делают специальные технологические приливы.

В машинах большой мощности при внешних диаметрах более 1 м подшипники выносят за корпус и устанавливают на специальных стояках. Стояковые подшипники крепят болтами к той же фундаментной плите, на которой установлен корпус. Во избежание появления подшипниковых токов один из стояков изолируют от фундаментной плиты изоляционной прокладкой, при этом с помощью изоляционных трубок и шайб изолируют также крепящие болты и штифты.

Подшипниковые токи, которые замыкаются по контуру вал – стояк подшипника – фундаментная плита – стояк подшипника – вал, приводят к коррозии поверхности подшипников, шеек вала и вызывают старение масла. Причиной появления этих токов является ЭДС, наводимая в вале от сцепленного с ним изменяющегося во времени потока, вызванного магнитной несимметрией из-за наличия стыков между частями статора и сегментами, наличием шпоночных канавок, эксцентричным положением ротора и т. д. Появление подшипниковых токов наблюдается главным образом у машин относительно больших мощностей.

По конструктивным признакам подшипники подразделяют на подшипники качения (роликовые и шариковые подшипники) и подшипники скольжения. По роду воспринимаемой нагрузки различают опорные подшипники с радиальной нагрузкой и упорные подшипники с аксиальной нагрузкой, а по функциональным признакам: несущие и направляющие подшипники.

В машинах с горизонтальным расположением вала в основном применяют радиальные однорядные шарико- и роликоподшипники. Радиальные шарикоподшипники могут, кроме радиальной нагрузки, воспринимать некоторую осевую нагрузку. При повышенном радиальном зазоре между шариками и дорожками качения колец подшипник приобретает свойства радиально-упорного подшипника и хорошо работает на восприятие больших осевых нагрузок. Поэтому в некоторых случаях (особенно в малых машинах) такие подшипники могут быть установлены в машинах с вертикальным расположением вала.

Роликоподшипники применяют для больших нагрузок, чем это допустимо для шарикоподшипников.

В машинах небольшой мощности при $h < 200$ мм чаще всего оба подшипника выбираются шариковыми. У машин средней и большой мощности подшипник со стороны привода, воспринимающий большую нагрузку, выбирается роликовым, а с противоположной стороны – шариковым.

От осевого перемещения на посадочных местах под действием осевой нагрузки кольца подшипников удерживаются при помощи выступа и гайки или специальной упорной пластинки, закрепляющейся на болтах в торце вала или насаживаемым на вал кольцом. В машинах небольшой мощности обычно не делают фиксации внутреннего кольца шарикоподшипника на валу, а закрепляют лишь наружное его кольцо подшипниковой крышкой, являющейся одновременно деталью, удерживающей смазку подшипника. Если в машине применяются оба шариковых подшипника, то для возможности перемещения подшипника в осевом направлении при расширении вала у одного из них, а иногда и у обоих, следует предусмотреть зазоры между крышками и наружным кольцом.

Подшипники катящегося трения смазываются преимущественно консистентными смазками. Смазка служит для обеспечения коррозионной стойкости подшипников, распределения и отвода тепла, снижения потерь энергии за счет предотвращения сухого трения, уменьшения шума, защиты от попадания грязи. Рабочее пространство подшипникового узла заполняется смазкой не более чем на $2/3$ объема. Выбор консистентной смазки проводится на основании данных об условиях работы подшипников. Для нормальной работы подшипников необходимо предусмотреть уплотнения подшипниковых узлов, защищающих их от пыли, грязи, а также препятствующих вытеканию смазки в полость машины. Применяются различные конструкции уплотнений: фетровые, кольцевые зазоры, манжетные, лабиринтные и др.

При больших частотах вращения (когда $dn > 300$, где n – частота вращения, об/мин; d – диаметр вала, м) для смазки подшипников применяют минеральные масла.

При проектировании машины перед конструктором ставится задача выбора по каталогу типа подшипника, соответствующего нагрузке и условиям его работы.

Для подбора конструкции, типа и размера подшипника необходимо знать:

- 1) значение и направление действующих на подшипник нагрузок;
- 2) характер нагрузки (спокойная, ударная, переменная);
- 3) диаметр цапфы, на которую сажается подшипник;
- 4) частоту вращения машины;
- 5) желательный срок службы подшипника.

В общем случае на подшипник действуют радиальная и осевая нагрузки. Выбор подшипника проводится по приведенной динамической нагрузке Q . Для однорядных радиальных шарикоподшипников эта нагрузка H .

Определяя приведенную нагрузку Q , а также учитывая частоту вращения подшипника n и требуемый срок службы U , находят динамическую грузоподъемность C (Н), которая является основной характеристикой подшипника: для шарикоподшипников и для роликоподшипников.

Срок службы (или долговечность) подшипника может быть задан или его выбирают равным $L_d > (15...20) \cdot 10^3$ ч.

По найденной динамической грузоподъемности по таблицам ГОСТ8338–75 и ГОСТ8328–75 выбирают конкретный подшипник и находят его габаритные размеры. Диаметр внутреннего кольца у выбранного подшипника должен быть равен диаметру цапфы (цапфа – часть вала, на которую горячей посадкой насаживается подшипник). Наряду с динамической грузоподъемностью в таблицах приведены данные о предельной частоте вращения. Расчетное значение C должно быть меньшим или равным табличному значению. Если расчетное значение C получается больше табличного, а долговечность нельзя уменьшить, то следует выбрать подшипник из другой, соответствующей заданным параметрам серии. В некоторых случаях можно пойти на установку сдвоенных подшипников. При применении сдвоенных подшипников, учитывая неравномерность распределения между ними нагрузки, каждый подшипник следует рассчитывать на нагрузку, равную 70 % всей нагрузки опоры. Подбор подшипников рекомендуется производить, начиная с легкой серии.

Подшипники скольжения применяют главным образом для крупных электрических машин и выполняют в виде стояковых подшипников. Корпус подшипника изготавливается из чугуна. В корпус входят стояк и верхняя крышка. Основным элементом подшипника является вкладыш-втулка, разрезанная по образующей на две половины. В его верхней половине выполняются одно или два отверстия для смазочных колец. Вкладыши изготавливаются из стали, чугуна, бронзы и других материалов.

Толщина вкладышей принимается равной $s = (0,05d + 5 \text{ мм}) \dots (0,1d + 0,5 \text{ мм})$, где d – диаметр цапфы. Внутренняя поверхность вкладыша, охватывающая цапфу вала, заливается антифрикционным белым сплавом – баббитом. Для улучшения связи между баббитом и вкладышем последний имеет кольцевые канавки в виде «ласточкина хвоста».

Толщина слоя заливки в зависимости от диаметра вкладыша равна 2...8 мм. Посадка вкладышей в корпус подшипников выполняется жесткой или самоустанавливающейся. При жесткой посадке вкладыш фиксируется в гнезде, при самоустанавливающейся он опирается на шаровые опоры и может занимать положение в своих гнездах соответственно прогибу или перекосу вала.

Для смазки трущихся поверхностей применяют масло. Способ подачи смазки выбирают в зависимости от условий работы машины. Наиболее распространенным способом смазки является кольцевая. Для этого на цапфу надевают металлическое кольцо большего диаметра. Кольцо свободно висит на цапфе, погружаясь в масляный резервуар подшипника. При вращении цапфы кольцо также начинает вращаться и, проходя через масляный резервуар, подает масло на верхнюю часть цапфы, где оно растекается по всей поверхности. Для контроля уровня масла в ванне подшипника имеется маслоуказатель, который снабжают

смотровым стеклом. Кольцевая смазка применяется при окружных скоростях цапф $v_{ц} = 2...10$ м/с. При скоростях $v_{ц} > 10$ м/с применяют принудительную смазку. В этом случае в пространство между трущимися поверхностями подается извне под давлением масло, которое затем стекает в масляную ванну и по спускной трубе идет в холодильник, а затем снова к насосу. При такой смазке в подшипник поступает такое количество масла, которое необходимо для смазки и охлаждения подшипника. Масло подают под давлением $(0,25...1) \cdot 10^5$ Па.

Находит применение также комбинированная система смазки, когда при принудительной смазке применяются маслоподающие кольца.

Для предотвращения попадания масла в машину и вытекания его из подшипника в месте выхода из стояка помещают лабиринтные уплотнения и маслоулавливающие кольца.

Отдельные элементы подшипников скольжения стандартизированы.

Низковольтные двигатели большей мощности с фазными и с короткозамкнутыми роторами выпускаются в большинстве случаев в двух исполнениях: IP23 и IP44.

Конструктивные исполнения асинхронных двигателей по способу монтажа соответствуют ГОСТ 2479. Наибольшее распространение получили группы исполнения IM2 – IM4, т. е. двигатели со станиной на лапах или с разного вида фланцами на станине или на подшипниковом щите. Среди двигателей малой мощности встречаются группы исполнения IM5 – машины без подшипниковых щитов и IM9 – машины специального исполнения, которые часто применяют как встроенные в различные механизмы, в ручной электрифицированный инструмент и т. п. Асинхронные двигатели мощностью более 1000 кВт, особенно с малой частотой вращения, часто выполняют с выносными подшипниковыми стойками – группа исполнения IM7 или IM8.

По степени защиты от воздействия окружающей среды наиболее характерны для двигателей малой и средней мощности исполнения IP44 и IP54 со способом охлаждения IC0141. Двигатели средней мощности выпускают также со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01. Двигатели большой мощности на высокое напряжение часто имеют закрытое исполнение со встроенным воздушным или водяным охладителем, например с охлаждением по способу IC37A81.

Сердечники статоров и роторов всех асинхронных двигателей общего назначения шихтуют из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм.

При длине сердечника менее 250...300 мм они выполняются без вентиляционных каналов. При большей длине сердечники подразделяют на пакеты длиной 40...50 мм каждый. Между пакетами устанавливают дистанционные распорки, при этом образуются радиальные вентиляционные каналы, служащие для прохода охлаждающего воздуха. Ширина каналов в большинстве машин выполняется равной 10 мм. В собранной машине радиальные каналы статора и ротора располагаются напротив друг друга.

Статоры машин общего назначения напряжением до 660 В, мощностью до 100 кВт имеют трапециевидные полузакрытые пазы с узким шлицем, размерные соотношения которых (ширину верхней и нижней частей и высоту паза) выполняют такими, чтобы зубцы статора имели параллельные стенки. Это уменьшает МДС зубцов по сравнению с зубцами с неравномерной площадью поперечного сечения. Обмотку таких машин выполняют из круглого провода.

В статорах машин большей мощности обмотку выполняют из прямоугольного провода, причем при напряжении, не превышающем 660 В, – из подразделенных катушек. Пазы статора в таких машинах полуоткрытые, что позволяет избежать большой неравномерности индукции в воздушном зазоре. Обмотку укладывают в пазы, пропуская через суженный шлиц паза каждую из полукатушек поочередно.

В статорах машин с номинальным напряжением 3 кВ и выше и машин специального исполнения независимо от напряжения выполняют обмотку из жестких, изолированных до укладки в пазы катушек. Поэтому пазы таких машин делают только открытыми.

Конструкция крепления сердечника статора в корпусе зависит от габаритов и мощности машины. В большинстве машин малой мощности корпуса выполняют из алюминия, в некоторых конструкциях – заливкой алюминия на собранный сердечник статора. Подшипниковые щиты также алюминиевые. В машинах большей мощности и корпуса, и подшипниковые щиты чугунные. В машинах больших габаритов корпуса сварные из стальных листов, закрытые снаружи листовой сталью. Магнитопровод крепится к продольным ребрам корпуса.

Магнитопровода роторов шихтуют из той же стали, что и статоров. В двигателях общего назначения с высотой оси вращения до 450 мм их насаживают непосредственно на вал, причем до высоты оси вращения 250 мм – на гладкий вал.

В двигателях с большей высотой оси вращения крепят на валу с помощью шпонки. Сердечники роторов больших габаритов насаживают на втулку или на остов ротора.

В большинстве асинхронных двигателей вентиляторы устанавливают на валу ротора, в двигателях со степенью защиты IP23 – внутри корпуса, со степенью защиты IP44 и IP54 – вне корпуса и защищают кожухом.

Асинхронные двигатели подразделяют на два типа: с короткозамкнутыми и фазными роторами. По конструкции они отличаются между собой только роторами и отдельными элементами корпусов. В пазах фазных роторов располагают изолированную трехфазную обмотку, жестко соединенную в звезду или в треугольник. Обмотка имеет три вывода, которые соединены токопроводами с контактными кольцами. Прилегающие к контактным кольцам щетки электрически соединяют выводы обмотки ротора с пусковым реостатом, который позволяет увеличивать сопротивление роторной цепи во время пуска двигателя. Контактные кольца располагают либо внутри корпуса, либо вне его на выступающем конце вала. При такой конструкции кольца и весь щеточный аппарат закрывают кожухом из листовой стали.

При пуске двигателя включают пусковые резисторы, что увеличивает активное сопротивление цепи ротора и, следовательно, пусковой момент двигателя и ограничивает ток при пуске.

Обмотки и сердечники статора и ротора являются основными частями электрической машины. Они и создают в ней условия для электромагнитных процессов, протекающих при преобразовании электрической энергии в механическую.

Обмотки короткозамкнутых роторов не имеют изоляции. В двигателях общего назначения мощностью до 300..400 кВт их выполняют заливкой пазов алюминия или его сплавами, причем одновременно со стержнями обмотки отливают замыкающие кольца с вентиляционными лопатками. В ряде конструкций двигателей этой мощности

и во всех двигателях большей мощности обмотку роторов изготавливают из вставных стержней, в подавляющем большинстве случаев – медных. К выступающим из пазов концам стержней припаивают или приваривают замыкающие кольца. Технология изготовления роторов с короткозамкнутой обмоткой значительно проще, чем фазных. Кроме того, в связи с отсутствием изоляции, контактных колец, скользящих контактов и пусковых реостатов уменьшаются габариты и стоимость двигателей, повышается их надежность и упрощаются техническое обслуживание и эксплуатация. Поэтому большинство современных асинхронных двигателей выполняют с короткозамкнутыми роторами. Одним из недостатков асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами является невозможность включить в цепь ротора во время пуска реостат для увеличения пускового момента и снижения тока.

При проектировании двигателей с короткозамкнутыми роторами направленным выбором параметров ограничивают пусковой ток до 6–7-кратного по сравнению с номинальным, а для повышения пусковых моментов используют эффект вытеснения тока в стержнях обмотки ротора. Он заключается в неравномерном распределении плотности тока по поперечному сечению стержня. Под действием эффекта вытеснения плотность тока в ближайшей к дну паза части каждого стержня уменьшается, а в верхней возрастает. Неравномерность распределения плотности тока вызывает увеличение электрических потерь в обмотке, эквивалентное увеличению ее активного сопротивления, и пусковой момент двигателя возрастает.

Действие эффекта вытеснения тока проявляется в большей степени при большей частоте тока, поэтому в двигательном режиме наибольшая неравномерность распределения плотности тока по сечению стержня наблюдается при $s = 1$. При этом же скольжении будет и наибольшее эквивалентное сопротивление обмотки ротора, вызывающее увеличение пускового момента. При разгоне двигателя частота тока в роторе уменьшается и, соответственно, уменьшается сопротивление обмотки. В режимах, близких к номинальному, частота тока в роторе мала, эффект вытеснения тока практически не проявляется и плотность тока одинакова по всему сечению стержней ротора.

Увеличение эквивалентного сопротивления под действием эффекта вытеснения тока проявляется в большей степени в стержнях, поперечное сечение которых имеет большую высоту или уменьшенную площадь верхней части по сравнению с нижней. Поэтому в роторах двигателей, предназначенных для работы с тяжелыми условиями пуска, делают глубокие прямоугольные пазы (глубокопазные роторы) или стержни обмотки выполняют фигурными. Обмотки роторов с фигурными пазами выполняют в большинстве двигателей заливкой алюминием или его сплавами. Это позволяет выполнять конфигурацию пазов с оптимальными размерными соотношениями стержней для достижения требуемого действия эффекта вытеснения тока.

Еще больший эффект увеличения сопротивления при пуске возникает в роторах с двойной беличьей клеткой, в пазах которой друг над другом располагают стержни двух обмоток. Верхние стержни образуют одну обмотку, нижние – другую. При пуске, когда эффект вытеснения тока проявляется в наибольшей степени, практически весь ток протекает по верхней клетке. Ее называют пусковой.

При работе в номинальном режиме и с малыми скольжениями действие эффекта вытеснения тока очень мало и ток распределяется равномерно по обеим обмоткам пропорционально их активному сопротивлению. Обмотку, образованную нижними стержнями, называют рабочей.

Обмотки роторов с двойной беличьей клеткой выполняют как литыми, так и из вставных стержней. В литых обмотках обе клетки (и рабочую, и пусковую) и замыкающие кольца одновременно заливают одинаковым металлом. В роторах со вставными стержнями рабочую обмотку выполняют из медных, а пусковую – обычно из латунных стержней. В таких роторах замыкающие кольца обмоток отдельные, из того же материала, что и стержни. Латунь применяют для пусковых клеток, т. к. она имеет большее удельное сопротивление, чем медь, и сопротивление обмотки ротора в пусковых режимах возрастает сильнее, чем при стержнях из одинакового материала. Кроме того, теплоемкость латуни выше, чем меди, поэтому нагрев латунных стержней за время пуска двигателя ниже, чем медных того же размера.

Двигатели с фигурными пазами или с двойной клеткой на роторе имеют более высокие пусковые характеристики, чем с грушевидными или полуовальными пазами, однако у них больше индуктивное сопротивление обмоток роторов. Это приводит к понижению максимальных моментов и ухудшению коэффициента мощности двигателей в номинальном режиме. Поэтому такие роторы выполняют лишь для двигателей, предназначенных для тяжелых условий пуска, для которых требования к пусковым характеристикам более важны, чем к другим энергетическим показателям [11].

Разработка новой серии асинхронных машин – Российские асинхронные (РА) на Ярославском электромашиностроительном заводе (ЯЭМЗ) началась в 1992 г.

В новую серию были заложены решения, позволившие изготавливать двигатели для любых требований потребителя. Это удалось сделать благодаря применению конструкции станины со съемными лапами, которые фиксируются по четырем направлениям. Применение съемных лап хотя и увеличивает трудоемкость, но позволяет несколько исполнений машины объединить в одной конструкции (фланцевое В5, на лапах В3 и на лапах с фланцем В35). Это приводит к значительной экономии оборотных средств завода, а потребитель может заменить поврежденную лапу новой, в то же время в конструкциях с постоянно прилитыми лапами их поломка приводит к замене всего двигателя.

В серии РА станины для высот оси вращения 71...132 мм включительно – алюминиевые, получаемые экструзией, щиты также алюминиевые. Для высот оси вращения, больших 132 мм, станины и щиты выполняют чугунами. Все станины имеют горизонтально-вертикальное ребрение, что позволяет увеличить теплоотдачу при снижении массы двигателя, а также улучшает эстетичность его формы. Особенно этому способствует экстремальная станина.

Внутренний диаметр сердечника статора D выбран так, что при фиксированном наружном диаметре D_a оптимизирован весь ряд мощностей для нескольких высот оси вращения. Такая унификация предусмотрена для всей серии РА. Вопросам унификации в новой серии РА уделено особое внимание, поскольку только на одной высоте оси вращения количество типоразмеров двигателей превышает несколько тысяч. Основным достоинством серии РА является возможность выпуска асинхронных двигателей,

удовлетворяющих требованиям ГОСТа, DIN и SENELEC, и при максимальной унификации отдельных узлов и деталей машины [11].

Внедрение профильной экструзионной станины в серии РА позволило снизить трудоемкость изготовления, повысить качество и снизить массу двигателя за счет лучшего теплосъема с поверхности станины. Экструзионные станины позволили отказаться от чистовой обработки замков статора, а также уменьшить аксиальную длину станины, т. к. они нарезаются из заготовки, получаемой с металлургических заводов.

Применение экструзионных станин на ЯЭМЗ ограничивалось диаметром 132 мм из-за технологических возможностей завода, но такие станины могут применяться и для больших высот, если это потребуются заказчикам.

Основной недостаток экструзионных станин – их более высокая стоимость по сравнению с литыми станинами.

Освоение серии РА позволило сократить зависимость от импорта и развивать экспорт асинхронных двигателей. Техничко-экономические показатели двигателей серии РА соответствуют или превосходят лучшие аналоги зарубежных фирм, а цены на продукцию значительно ниже, чем у конкурентов [11].

Список литературы

1 Электрические машины: методические рекомендации к практическим занятиям / Сост. В. А. Лапицкий. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – 44 с.

2 **Копылов, И. П.** Проектирование электрических машин / Под ред. И. П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1993. – 464 с.

3 Автоматизированное проектирование электрических машин / Ю. Б. Бородулин [и др.] / Под ред. Ю. Б. Бородулина. – Москва: Высшая школа, 1989. – 280 с.

4 **Гольдберг, О. Д.** Проектирование электрических машин / Под ред. О. Д. Гольдберга. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 2001. – 430 с.

5 **Вольдек, А. И.** Электрические машины: учебник для студентов высших технических учебных заведений / Под ред. А. И. Вольдека. – 3-е изд., перераб. – Москва: Альянс, 2018. – 832 с.: ил.

6 **Копылов, И. П.** Проектирование электрических машин / Под ред. И. П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с.

7 **Копылов, И. П.** Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / Под общ. ред. И. П. Копылова. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – Т. 1–2. – 688 с.

8 **Филиппов, И. Ф.** Теплообмен в электрических машинах / И. Ф. Филиппов. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

9 **Копылов, И. П.** Электрические машины / И. П. Копылов. – Москва: Высшая школа, 2000. – 607 с.

10 **Кожевников, В. А.** Развитие теории и конструкции машин постоянного тока / В. А. Кожевников. – Ленинград: Наука, 1985. – 147 с.

11 **Попов, В. И.** Современные асинхронные машины: Новая Российская серия РА. / В. И. Попов. – Москва: Знак, 1999. – 256 с.