

О. Д. ГОЛЬДБЕРГ, И. С. СВИРИДЕНКО

# ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И САПР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

УЧЕБНИК

Под редакцией проф. О. Д. ГОЛЬДБЕРГА

*Допущено Учебно-методическим объединением  
по образованию в области энергетики и электротехники  
в качестве учебника для студентов  
высших учебных заведений, обучающихся по специальности  
«Электромеханика» направления подготовки  
«Электротехника, электромеханика и электротехнологии»*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2008

УДК 621.313(075.8)

ББК 30.2-5-05я73

Г63

Рецензенты:

проф. МАИ, д-р техн. наук, акад. АЭН РФ *Б.Л. Алиевский*;  
проф. МЭИ, д-р техн. наук, действительный член АЭН РФ *В.Я. Беспалов*

**Гольдберг О.Д.**

Г63 Инженерное проектирование и САПР электрических машин : учебник для студ. высш. учеб. заведений / О.Д. Гольдберг, И.С. Свириденко ; под ред. О.Д. Гольдберга. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — 560 с.

ISBN 978-5-7695-4088-2

Рассмотрены вопросы инженерного проектирования электрических машин общего назначения, особенности проектирования асинхронных двигателей, машин постоянного тока и синхронных машин мощностью до 1 000 кВт. Даны рекомендации по проектированию серий электрических машин и отдельных машин. Отдельная глава посвящена САПР электрических машин.

Для студентов высших учебных заведений. Может быть полезен инженерам, занимающимся проектированием электрических машин.

УДК 621.313(075.8)

ББК 30.2-5-05я73

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

© Гольдберг О.Д., Свириденко И.С., 2008

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2008

ISBN 978-5-7695-4088-2

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2008

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

В настоящее время электромашиностроительные заводы при проектировании серий и отдельных электрических машин пользуются системой автоматизированного проектирования электрических машин (САПР), что позволяет находить оптимальные решения при проектировании.

Студентам при изучении этой дисциплины необходимо овладеть навыками инженерного проектирования, выполняя все расчеты вручную, используя рекомендации учебника и справочные данные, приведенные в приложении. После этого можно знакомиться с САПР.

Процесс создания электрических машин включает в себя проектирование, изготовление и испытание. В настоящем учебнике рассмотрены вопросы проектирования электрических машин. Под проектированием электрической машины понимается расчет размеров отдельных ее частей, параметров обмоток, рабочих и других характеристик, конструирование машины в целом, а также ее отдельных деталей и сборочных единиц, оценка технико-экономических показателей спроектированной машины, включая показатели надежности.

Электротехнической промышленностью выпускается много разных видов электрических машин, и рассмотреть подробно методы проектирования всех этих машин в одной книге невозможно. Поэтому в соответствии с программой курса «Инженерное проектирование и САПР электрических машин» в гл. 1... 8 рассмотрены общие вопросы проектирования электрических машин общего назначения с моментом вращения  $1... 6\,500 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , что примерно соответствует мощности (при  $1\,500 \text{ об/мин}$ )  $0,12... 1\,000 \text{ кВт}$ , а в гл. 9... 11 — методы проектирования наиболее распространенных и массово или серийно выпускаемых видов электрических машин: асинхронных, постоянного тока и синхронных. Вопросы проектирования трансформаторов, турбо- и гидрогенераторов здесь не рассматриваются.

Для удобства пользования в учебнике приведены справочные данные, необходимые для проектирования. Примеры расчета машин даны после каждого раздела в гл. 9... 11.

На заводах электрические машины проектируются в виде серий. Студенту при курсовом и дипломном проектировании обы-

чно задается рассчитать единичную электрическую машину или часть серии электрических машин. Это задание лучше выполнять при минимальном использовании ЭВМ, так как при этом студент глубже усваивает особенности проектирования на всех этапах.

Повышению надежности электрических машин придается большое значение, ее нельзя рассматривать без применения методов расчетной оценки надежности. Такие методы изложены в гл. 6. Прежде чем приступить к проектированию электрических машин, необходимо внимательно изучить стандарты, касающиеся параметров и размеров, а также условных обозначений машин (см. подразд. 1.2).

В предлагаемой книге принята следующая терминология: неподвижная часть машины переменного тока называется статором, а вращающаяся — ротором; в машинах постоянного тока неподвижная часть называется станиной, а вращающаяся — якорем. В основу обозначений параметров и размеров активных частей положена система, согласно которой обозначения состоят из латинских или греческих букв, а индексы — из строчных букв, главным образом русского и греческого алфавитов, или арабских цифр. Параметры и размеры, относящиеся к неподвижной части машины, обозначаются индексом «1», а вращающейся — индексом «2». Размеры деталей, направленные вдоль оси вращения машины, обозначаются буквой  $l$  (длина), а поперек — буквами  $b$  (ширина) и  $h$  (высота).

Предисловие, гл. 1...9 подготовлены О.Д.Гольдбергом, гл. 11 — И.С.Свириденко. Гл. 10 написана совместно.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

---

## 1.1. Основные направления в развитии электромашиностроения

Электромашиностроение прошло большой путь развития, начиная от простейших моделей, созданных полтора века тому назад на основе открытий М. Фарадея (1821—1831 гг.), до современных электродвигателей и генераторов.

Хотя на протяжении нескольких последних десятилетий принципы устройства электрических машин остались в основном теми же, однако коренным образом изменились их конструктивное оформление, рабочие характеристики и технико-экономические показатели. При этом почти все электромашиностроители перешли на проектирование и изготовление рядов или серий электрических машин.

Основные тенденции в развитии электромашиностроения:

- применение утонщенной корпусной изоляции и обмоточных проводов с малой толщиной изоляции (главным образом эмальпроводов), обладающих необходимой механической и электрической прочностью. При этом повышаются коэффициент заполнения паза медью и соответственно использование объема машины;

- использование более нагревостойкой изоляции. В начале развития электромашиностроения применялась изоляция класса нагревостойкости *A*, затем — классов *E* и *B*. В настоящее время наибольшее распространение получила изоляция класса *F*. В машинах, работающих в более тяжелых условиях, распространена изоляция класса нагревостойкости *H*;

- применение улучшенных марок электротехнической стали. Широко используемые в настоящее время марки холоднокатаной электротехнической стали обладают большей магнитной проницаемостью и меньшими удельными потерями в сравнении с соответствующими марками горячекатаной стали;

- усовершенствование охлаждения машин путем повышения производительности вентиляторов, уменьшения аэродинамического сопротивления воздухопроводов, увеличения поверхности охлаждения отдельных обмоток и всей машины за счет ребрения корпуса (в закрытых машинах), а также усиления теплопередачи

путем лучшего заполнения воздушных прослоек в обмотках пропитываемыми лаками и компаундами;

- усовершенствование методов расчета машин;
- улучшение конструкции машин путем придания узлам и деталям эстетических и рациональных форм при обеспечении снижения их массы и повышения прочности.

## **1.2. Стандартизация в области электрических машин**

Одна из важнейших задач — улучшение качества продукции — неразрывно связана с уровнем стандартизации. Основные технические требования к конструктивным исполнениям, размерам и параметрам, методам и средствам испытаний электрических машин, а также требования к материалам и полуфабрикатам, необходимым для производства машин, устанавливаются и определяются стандартами.

Большим резервом повышения экономической эффективности промышленности является дальнейшее развитие внешних экономических отношений, расширение выпуска изделий, в том числе электрических машин на экспорт. В связи с этим все большее внимание уделяется согласованию на международной основе требований национальных стандартов. Международное сотрудничество в области стандартизации играет важную роль в устранении технических барьеров во внешней торговле и установлении международных научно-технических связей в электромашиностроении.

К основным международным организациям в области стандартизации по электротехнике, участником которых является Россия, относятся Международная организация по стандартизации (ИСО) и Международная электротехническая комиссия (МЭК). Вопросами разработки рекомендаций занимаются технические комитеты, подкомитеты и создаваемые в них рабочие группы. Комитеты ИСО определяют тематику, охватывающую отдельные системы и даже отрасли, а также занимаются вопросами электротехники, в то время как комитеты МЭК образованы главным образом для рассмотрения тех или иных видов электротехнического оборудования; в частности Комитет № 2 занимается вращающимися электрическими машинами всех мощностей и размеров (за исключением тяговых электродвигателей).

Международные рекомендации разрабатывают по отдельным видам изделий и материалов, терминологии, условным обозначениям, графическим изображениям и т.п. Рекомендации носят факультативный характер, т.е. их применение в национальной практике отдельных стран не обязательно. Однако в настоящее время практически все национальные стандарты по электриче-

ским машинам создаются с учетом или непосредственно на базе рекомендаций ИСО и МЭК. Начиная с 1972 г. ИСО выпускает международные стандарты.

Важное значение имеют стандарты ИСО и рекомендации МЭК при проектировании электрических машин. К ним относится классификация номинальных режимов работы электрических машин (при кажущемся их многообразии). Не менее важно, чтобы принимаемые для единых серий электрических машин шкалы мощностей соответствовали ряду мощностей, рекомендованному МЭК. Значения номинальных напряжений, на которые должны проектироваться электрические машины, также должны соответствовать международным стандартам. Номинальные частоты вращения для двигателей и генераторов стандартизированы ИСО.

Применяемые иногда в отечественной литературе термины, характеризующие степень защиты электрических машин от внешних воздействий, такие как «электрическая машина защищенного исполнения» или «электрическая машина закрытого исполнения», не соответствуют рекомендациям МЭК и поэтому не должны использоваться.

При проектировании электрических машин необходимо учитывать требования стандартов России, а также рекомендации ИСО и МЭК. Далее рассматриваются стандартизованные виды исполнений и их обозначения, выходные параметры и установочные и присоединительные размеры электрических машин.

**Номинальные режимы работы.** Номинальные параметры электрических машин должны соответствовать определенному режиму работы. Стандарт предусматривает восемь режимов работы с условными обозначениями S1 ... S8. Наиболее распространен продолжительный номинальный режим работы, который характеризуется продолжительностью работы машины, достаточной для достижения установившейся температуры всех частей электрической машины при неизменной внешней нагрузке — условное обозначение S1.

**Номинальные мощности.** Номинальные мощности электрических машин переменного и постоянного тока (двигателей и генераторов) регламентированы стандартом, в котором учтены рекомендации и публикации МЭК 72 в части номинальных мощностей. Согласно ГОСТу номинальные мощности должны соответствовать работе электрических машин при номинальных значениях напряжения, частоты вращения, частоты переменного тока, коэффициента мощности, а также при условиях и режимах работы, установленных соответствующими стандартами.

Стандартом предусмотрены следующие значения номинальных мощностей (в пределах от 0,12 до 1 000 кВт): 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800 и 1 000 кВт. Эти значения мощностей обязательны для всех исполнений элек-

трических машин защите и монтажу, а также для всех способов охлаждения. Для машин специализированного назначения (рольганговые, краново-металлургические и др.) указанные значения мощностей не обязательны.

**Номинальные напряжения.** Номинальные напряжения генераторов и двигателей до 1 000 В и свыше регламентированы стандартами. В стандартах учтены публикации МЭК 38. Стандартом установлены следующие наиболее широко применяемые номинальные напряжения, В:

Род тока	Переменный трехфазный	Постоянный
Генератор .....	230, 400, 690, 6 300, 10 500	115, 230, 460
Двигатель .....	220, 380, 660, 6 000, 10 000	110, 220, 440

**Номинальные частоты вращения.** Номинальные частоты вращения электрических машин регламентированы стандартом. Установлены следующие номинальные частоты вращения при частоте переменного тока 50 Гц для синхронных генераторов: 125; 150; 157,6; 214,3; 250; 300; 375; 428,6; 500; 600; 750; 1 000; 1 500 и 3 000 об/мин. Эта шкала используется также для синхронных и асинхронных двигателей с некоторыми изменениями. Так, для синхронных двигателей дополнительно включены частоты вращения 100 и 166,6 об/мин, но исключена частота 428,6 об/мин; для асинхронных двигателей добавлены частоты вращения 120 и 166 об/мин, но исключены частоты 214,3 и 428,6 об/мин. Значения номинальных частот вращения асинхронных двигателей должны быть меньше перечисленных на частоту вращения, определяемую значением номинального скольжения.

Для генераторов постоянного тока в пределах до 3 000 об/мин стандартом установлены следующие номинальные частоты вращения: 400; 500; 600; 750; 1 000; 1 500; 2 000; 3 000, для двигателей — 25; 50; 75; 100; 125; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 1 000; 1 500; 2 000; 2 200 и 3 000 об/мин. Наименьшие значения частоты вращения двигателей (с регулированием изменения поля главных полюсов) и наибольшие значения частоты вращения двигателей (с регулированием изменения напряжения на якоре при номинальном напряжении и номинальной нагрузке на валу) должны соответствовать указанным номинальным значениям частот вращения двигателей.

Стандартом также установлены допускаемые отклонения значения номинальной частоты вращения двигателей и генераторов постоянного тока.

**Степени защиты от внешних воздействий.** Электрические машины могут иметь различные исполнения по защите от внешних воздействий, которые, с одной стороны, должны обеспечить защиту обслуживающего персонала от прикосновения к токоведущим или вращающимся частям, а с другой — защиту машины от попада-



ния внутрь нее твердых посторонних тел и воды. Обозначения степени защиты регламентируются ГОСТ 14254—96. В стандарте учтены требования рекомендаций публикации МЭК 34-5.

Согласно указанному стандарту обозначение степеней защиты состоит из букв IP — начальных букв английских слов International, Protection (международное обозначение степеней защиты) — и следующих за ними цифр. Первая цифра характеризует степень защиты от прикосновения и от проникновения твердых тел в машину. Более распространенными являются следующие степени защиты по первой характеристической цифре:

2 — защита от возможности соприкосновения пальцев с токоведущими или движущимися частями внутри машины. Защита машины от попадания внутрь нее твердых посторонних тел диаметром более 12 мм;

4 — защита от соприкосновения инструмента, проволоки или других металлических предметов, толщина которых превышает 1 мм, с токоведущими или движущимися частями внутри машины. Защита машины от попадания внутрь нее легких твердых посторонних тел диаметром более 1 мм.

Вторая цифра характеризует степень защиты машины от проникновения воды. Более распространенными являются следующие степени защиты по второй характеристической цифре:

2 — защита от капель воды. Капли воды, падающие под углом в пределах до 15° к вертикали, не должны оказывать на машину вредного действия;

3 — защита от дождя. Вода, падающая на машину в виде дождя под углом в пределах до 60° к вертикали, не должна оказывать на машину вредного действия;

4 — защита от брызг. Брызги воды любого направления, попадающие на машину, не должны оказывать на нее вредного действия.

Наибольшее применение нашли следующие степени защиты:

IP22 — машина, защищенная от попадания твердых тел размером более 12 мм и от капель воды (защищенная машина);

IP23 — машина, защищенная от попадания твердых тел размером более 12 мм и от дождя (защищенная машина);

IP44 — машина, защищенная от попадания твердых тел размером более 1 мм и от водяных брызг (закрытая машина).

**Способы охлаждения.** Обозначения способов охлаждения регламентирует стандарт, учитывающий рекомендации публикации МЭК 34-6. Согласно этому стандарту обозначение способов охлаждения состоит из букв IC — начальных букв английских слов International, Cooling (международное обозначение способов охлаждения) — и следующей за ними характеристики цепей охлаждения. Последняя состоит из прописной буквы, условно обозначающей вид хладагента, и следующих за ней двух цифр; при ох-

лаждении воздухом буква опускается. Первая цифра условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая — способ его перемещения. Из указанных в стандарте более распространенными являются следующие условные обозначения цепей.

Условные обозначения устройства цепи (первая цифра):

0 — свободная циркуляция;

1 — охлаждение с помощью подводящей трубы;

3 — охлаждение с помощью подводящей и отводящей труб;

4 — охлаждение с помощью наружной поверхности машины;

5 — охлаждение с помощью встроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

6 — охлаждение с помощью пристроенного охладителя (с использованием окружающей среды).

Условные обозначения способа передвижения хладагента (вторая цифра):

0 — свободная конвекция;

1 — самовентиляция;

3 — перемещение хладагента с помощью пристроенного зависимого устройства;

5 — перемещение хладагента с помощью встроенного независимого устройства;

6 — перемещение хладагента с помощью пристроенного независимого устройства;

7 — перемещение хладагента с помощью отдельного и независимого устройства.

Если машина имеет две или более цепей охлаждения, то в обозначении указывают характеристики всех цепей охлаждения начиная с характеристики цепи со вторичным хладагентом (с более низкой температурой). Чаще применяют следующие способы охлаждения, обозначения которых будут использованы в книге:

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

IC0141 — закрытая машина, обдуваемая наружным вентилятором, расположенным на валу машины;

IC0641 — закрытая машина, обдуваемая наружным пристроенным вентилятором с приводным электродвигателем, установленным на машине и питаемым независимо от охлаждаемой машины;

IC0041 — закрытая машина с естественным охлаждением;

IC0151 — закрытая машина с охлаждением с помощью встроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

IC0161 — закрытая машина с охлаждением с помощью пристроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

IC13 — защищенная машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей трубы, осуществляемое пристроенным зависимым устройством;

IC17 — защищенная машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей трубы, осуществляемое отдельным и независимым устройством;

IC05 — то же, охлаждение с помощью встроенного вентилятора с приводным электродвигателем, установленным на машине и питаемым независимо от охлаждаемой машины;

IC06 — то же, охлаждение с помощью пристроенного двигателя-вентилятора, питаемого независимо от охлаждаемой машины;

IC37 — закрытая машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей и отводящей труб, осуществляемое отдельным и независимым устройством.

Далее для машин с независимой вентиляцией будет приводиться ссылка только на способы охлаждения IC17 и IC37, поскольку все перечисленные способы независимой вентиляции практически равноценны по эффекту охлаждения.

**Исполнения по способу монтажа.** Формы исполнения по способу монтажа и их условные обозначения регламентируются публикацией МЭК 34-7. Обозначение формы исполнения по способу монтажа состоит из букв IM — начальных букв английских слов International, Mounting (международное обозначение исполнений по способу монтажа) — и следующих за ними цифр. Первая цифра обозначает группу конструктивного исполнения, например цифра 1 — машину на лапах с одним или двумя подшипниковыми щитами; 2 — то же, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах); 3 — машину без лап с одним или двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите и т. д.

Вторая и третья цифры обозначают способ монтажа, например при группе конструктивного исполнения 1 цифры 00 обозначают машину с горизонтально направленным концом вала и креплением к фундаменту лапами, 01 — с вертикально направленным концом вала вниз и креплением к стене лапами; в группе 3 цифры 01 соответствуют вертикально направленному концу вала вниз и креплению к фундаменту фланцем и т. д. Четвертая цифра обозначает исполнение вала, например цифра 1 — машину с одним цилиндрическим концом вала; 2 — то же, с двумя цилиндрическими концами вала и т. д.

Наиболее распространенными исполнениями по способу монтажа являются IM1001 — машина с двумя подшипниковыми щитами на лапах, с одним горизонтально направленным цилиндрическим концом вала; IM1011 — то же, с вертикально направленным вниз одним цилиндрическим концом вала; IM3011 — машина с двумя подшипниковыми щитами без лап, с фланцем на одном подшипниковом щите, с вертикально направленным вниз одним цилиндрическим концом вала.

**Климатические условия работы.** Конструкция и исполнение машин должны предусматривать способность противостоять в условиях

эксплуатации воздействию климатических факторов внешней среды. Стандарты регламентируют исполнение машин, категории их размещения, условия эксплуатации, хранения и транспортирования с учетом воздействия климатических факторов (температуры, влажности, пыли, солнечной радиации, интенсивности дождя и т.п.).

Каждому климатическому исполнению машин присвоено буквенное обозначение, например для районов с умеренным климатом — У, с холодным климатом — ХЛ и т.д.

Категория размещения машин имеет цифровое обозначение. Например, при наиболее благоприятных условиях, когда машина предназначена для установки в закрытых отапливаемых и вентилируемых производственных или других помещениях, категория размещения обозначается цифрой 4; категория размещения машины, предназначенной для работы в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, обозначается цифрой 3.

Цифровое обозначение категории размещения следует за буквенным, характеризующим условия климата. Например, исполнение машины, предназначенной для районов с умеренным климатом при категории размещения 4, имеет условное буквенно-цифровое обозначение У4.

**Установочные и присоединительные размеры.** Высоты оси вращения  $h$  электрических машин с горизонтальной осью вращения, равные расстоянию от оси вращения до опорной плоскости машины, регламентированы стандартом, который соответствует рекомендациям и публикациям МЭК 72, МЭК 72А и ИСО Р496.

Каждому значению  $h$  соответствуют определенные установочные и присоединительные размеры, регламентированные стандартами. Эти стандарты соответствуют рекомендациям публикаций МЭК 72, МЭК 72А и ИСО Р775. Значения  $h$  и связанные с ними установочно-присоединительные размеры (мм) для  $h = 56 \dots 400$  мм приведены в табл. 1.1 и для  $h > 400$  мм в табл. 1.2.

Размер  $l_{31}$  (независимо от  $h$ ) выбирают из следующего ряда: 100; 200; 224; 250; 280; 315; 335; 355; 375; 400; 425; 450; 475; 500; 530; 560; 600; 630; 670; 710; 750; 800; 900 и 1 000 мм.

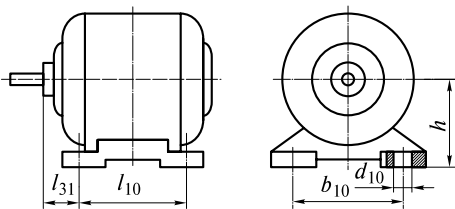
Длина выступающего конца вала, размеры призматической шпонки и шпоночного паза, а также наибольший допускаемый момент вращения  $M$ , связанные с диаметром выступающего цилиндрического конца вала, приведены в табл. 1.3.

Предельные отклонения на установочные и присоединительные размеры регламентированы стандартом:

Высота $h$ , мм .....	Свыше 50 до 250	Свыше 250 до 650
Предельные отклонения, мм .....	-0,5	-1,0

Допускаемые отклонения для размеров  $b_{10}$  и  $l_{10}$  составляют  $0,3z$ , где  $z$  — диаметральный зазор, определяемый как разность между

Таблица 1.1

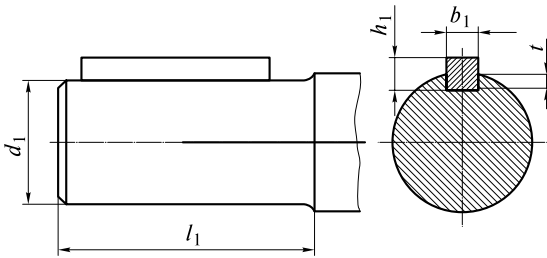


$h$	$b_{10}$	$l_{10}$	$l_{31}$	$d_{10}$	$h$	$b_{10}$	$l_{10}$	$l_{31}$	$d_{10}$
56	90	71	36	5,8	200	318	228 267	133	19
63	100	80	40	7	—	—	305	—	—
71	112	90	45	7	225	356	286 311	149	19
80	125	100	50	10	—	—	356	—	—
90	140	100 125	56	10	250	406	311 349 406	168	24
100	160	112 140	63	12	280	457	368 419 457	190	24
112	190	114 140 159	70	12	315	508	406 457 508	216	28
132	216	140 178 203	89	12	355	610	500 560 630	254	28
160	254	178 210 254	108	15	400	686	560 630 710 800 900	280	35
180	279	203 241 279	121	15					

Таблица 1.2

$h$	$b_{10}$	$l_{10}$	$d_{10}$
450	710; 800; 900; 1 000; 1 120	355; 400; 450; 500; 560; 630; 710; 800; 900; 1 000; 1 120; 1 250	35
500	800; 900; 1 000; 1 120; 1 250	400; 450; 500; 560; 630; 710; 800; 900; 1 000; 1 120; 1 250; 1 400	42

Таблица 1.3



$d_1$	$l_1$	$b_1$	$h_1$	$t$	$M$ , Н·м	$d_1$	$l_1$	$b_1$	$h_1$	$t$	$M$ , Н·м
мм						мм					
7	16	2	2	1,2	0,25	55	110	16	10	6	335
9	20	3	3	1,8	0,63	60	140	18	11	7	450
11	23	4	4	2,5	1,25	65	140	18	11	7	630
14	30	5	5	3,0	2,8	70	140	20	12	7,5	800
16	40	5	5	3,0	4,5	75	140	20	12	7,5	1 000
18	40	6	6	3,5	7,1	80	170	22	14	9	1 250
19	40	6	6	3,5	8,25	85	170	22	14	9	1 600
22	50	6	6	3,5	14	90	170	25	14	9	1 600
24	50	8	7	4,0	18	95	170	25	14	9	2 360
28	60	8	7	4,0	31,5	100	210	28	16	10	2 800
32	80	10	8	5,0	50	110	210	28	16	10	4 000
38	80	10	8	5,0	90	120	210	32	18	11	5 300
42	110	12	8	5,0	125	130	250	32	18	11	7 400
48	110	14	9	5,5	200						

значениями номинальных диаметров отверстия  $d_{10}$  и крепежной детали.

Пределы отклонения размеров  $l_{31}$  не должны превышать следующих значений:

Номинальный

диаметр

вала  $d_1$ , мм ..... 6... 10    10... 25    25... 45    45... 60    60... 220

Предельные

отклонения

размера  $l_{31}$ , мм .....  $\pm 1,0$      $\pm 1,5$      $\pm 2,0$      $\pm 3,0$      $\pm 4,0$

Предельные отклонения диаметров цилиндрических концов валов должны соответствовать следующим значениям:

Номинальный диаметр вала $d_1$ , мм	..... 7... 10	10... 18	18... 30	30... 50	50... 80	80... 110
Предельные отклонения размера $d_1$ , мм:						
верхнее	..... +0,007	+0,008	+0,009	+0,018	+0,030	+0,035
нижнее	..... -0,002	-0,003	-0,004	+0,020	+0,011	+0,013

Требования на предельные отклонения должны учитываться при разработке чертежей.

### 1.3. Главные размеры

К *главным размерам электрических машин переменного тока* относятся внутренний диаметр  $D_1$  и длина  $l_1$  сердечника статора; к *главным размерам машин постоянного тока* — наружный диаметр  $D_{н2}$  и длина  $l_2$  сердечника якоря. Указанные размеры называются главными, так как они определяют остальные размеры машин. От главных размеров зависят габаритные размеры, масса и другие технико-экономические показатели машин.

Определим связь главных размеров с частотой вращения, электромагнитными нагрузками (линейной нагрузкой и магнитной индукцией в воздушном зазоре), а также с другими параметрами машин. У машины переменного тока расчетная (внутренняя) мощность,  $В \cdot А$ , определяется по формуле

$$P' = m_1 E_1 I_1, \quad (1.1)$$

где  $m_1$  — число фаз обмотки статора;  $E_1$  — ЭДС фазы обмотки статора асинхронных двигателей (у синхронных машин  $E_1 = E_d$ );  $I_1$  — ток фазы обмотки статора.

Учитывая, что

$$E_1 = 4k_{\Phi} f_1 k_{\text{об1}} w_1 \Phi; \quad (1.2)$$

$$f_1 = \frac{p n_1}{60}; \quad (1.3)$$

$$\Phi = \alpha' \tau l_1' B_{\delta} \cdot 10^{-6}; \quad (1.4)$$

$$\tau = \frac{\pi D_1}{2p}; \quad (1.5)$$

$$A_1 = \frac{20 m_1 w_1 I_1}{\pi D_1}, \quad (1.6)$$

расчетную мощность,  $B \cdot A$ , можно определить по следующей формуле:

$$P' = \frac{D_1^2 l_1' n_1 A_1 B_\delta \alpha' k_\Phi k_{\text{об1}}}{6,1 \cdot 10^7}. \quad (1.7)$$

В формулах (1.2) — (1.7)  $k_\Phi$  — коэффициент формы кривой поля, представляющий собой отношение действующего значения ЭДС к среднему;  $f_1$  — частота тока в сети, Гц;  $k_{\text{об1}}$  — коэффициент обмотки статора основной гармонической кривой ЭДС;  $w_1$  — число последовательно соединенных витков фазы обмотки статора;  $\Phi$  — магнитный поток, Вб;  $p$  — число пар полюсов машины;  $n_1$  — синхронная частота вращения, об/мин;  $\alpha'$  — расчетное отношение среднего значения индукции в воздушном зазоре к ее максимальному значению;  $\tau$  — полюсное деление;  $l_1'$  — расчетная длина сердечника статора, мм;  $B_\delta$  — максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл;  $A_1$  — линейная нагрузка обмотки статора, А/см;  $D_1$  — диаметр, мм.

Формулу (1.7) можно представить в другом виде:

$$P' = \frac{D_1^2 l_1' n_1}{C_A}, \quad (1.8)$$

где

$$C_A = \frac{D_1^2 l_1' n_1}{P'} = \frac{6,1 \cdot 10^7}{A_1 B_\delta \alpha' k_\Phi k_{\text{об1}}} \quad (1.9)$$

— *машинная постоянная Арнольда*,  $\frac{\text{мм}^3 \cdot \text{об/мин}}{B \cdot A}$ .

Величину  $K_A$ , обратную машинной постоянной  $C_A$ , называют *коэффициентом использования* машины,  $\frac{B \cdot A}{\text{мм}^3 \cdot \text{об/мин}}$ ,

$$K_A = \frac{P'}{D_1^2 l_1' n_1} = \frac{A_1 B_\delta \alpha' k_\Phi k_{\text{об1}}}{6,1 \cdot 10^7}. \quad (1.10)$$

Величины  $C_A$  и  $K_A$  характеризуют уровень использования активных материалов, к которым относятся медь и алюминий обмоток, а также сталь магнитопровода машин.

Расчетная мощность,  $B \cdot A$ ,

- для двигателей переменного тока

$$P' = m_1 E_1 I_1 = m_1 k_H U_1 I_1 = k_H P_1 = \frac{k_H P_2}{\eta \cos \varphi}; \quad (1.11)$$



• для генераторов переменного тока

$$P' = m_1 E_1 I_1 = m_1 k_H U_1 I_1 = \frac{k_H P_2}{\cos \varphi}, \quad (1.12)$$

где  $k_H$  — коэффициент, равный отношению ЭДС к напряжению, о. е.;  $U_1$  — номинальное фазное напряжение, В;  $P_1$  — подводимая мощность, В · А;  $P_2$  — отдаваемая мощность, Вт;  $\eta$  и  $\cos \varphi$  — КПД и коэффициент мощности при номинальной нагрузке, о. е.

Для асинхронных двигателей  $k_H = \frac{E_1}{U_1}$ , для синхронных —  $k_H = \frac{E_\delta}{U_1}$ .

У асинхронных двигателей для удобства расчета считаем значение магнитного потока от основной гармонической индукции; соответственно коэффициент формы поля для синусоиды  $k_\Phi = 1,11$ , а  $\alpha' = \frac{2}{\pi}$ , тогда формулы (1.7), (1.9) и (1.10) примут следующий вид:

$$P' = \frac{D_1^2 l_1' n_1 A_1 B_\delta k_{\text{об1}}}{8,62 \cdot 10^7}; \quad (1.13)$$

$$C_A = \frac{D_1^2 l_1' n_1}{P'} = \frac{8,62 \cdot 10^7}{A_1 B_\delta k_{\text{об1}}}; \quad (1.14)$$

$$K_A = \frac{P'}{D_1^2 l_1' n_1} = \frac{A_1 B_\delta k_{\text{об1}}}{8,62 \cdot 10^7}. \quad (1.15)$$

Расчетную мощность, Вт, машин постоянного тока определяют по формуле

$$P' = E_2 I_2, \quad (1.16)$$

где  $E_2$  и  $I_2$  — ЭДС и ток якоря соответственно.

Учитывая, что

$$E_2 = \frac{2p}{2a} n w_2 \frac{\Phi}{30}; \quad (1.17)$$

$$\Phi = \alpha' \tau l_2' B_\delta \cdot 10^{-6}; \quad (1.18)$$

$$\tau = \frac{\pi D_{\text{H2}}}{2p}; \quad (1.19)$$

$$A_2 = \frac{20 w_2 I_2}{\pi D_{\text{H2}} \cdot 2a}, \quad (1.20)$$

расчетную мощность можно определить по формуле

$$P' = \frac{D_{H2}^2 l_2' n A_2 B_8 \alpha'}{6,1 \cdot 10^7}. \quad (1.21)$$

В формулах (1.17) — (1.21)  $p$  — число пар полюсов;  $a$  — число пар параллельных ветвей обмотки якоря;  $n$  — частота вращения при номинальной нагрузке, об/мин;  $w_2$  — общее число витков обмотки якоря;  $\Phi$  — магнитный поток в якоре, Вб;  $\alpha'$  — расчетный коэффициент полюсной дуги, равный отношению расчетной полюсной дуги к полюсному делению;  $l_2'$  — расчетная длина сердечника якоря, мм;  $D_{H2}$  — диаметр, мм;  $A_2$  — линейная нагрузка обмотки якоря, А/см.

Формулу (1.21) можно представить в другом виде:

$$P' = \frac{D_{H2}^2 l_2' n}{C_A}, \quad (1.22)$$

где

$$C_A = \frac{D_{H2}^2 l_2' n}{P'} = \frac{6,1 \cdot 10^7}{A_2 B_8 \alpha'} \quad (1.23)$$

— машинная постоянная,  $\frac{\text{мм}^3 \cdot \text{об/мин}}{\text{Вт}}$ ;

$$K_A = \frac{P'}{D_{H2}^2 l_2' n} = \frac{A_2 B_8 \alpha'}{6,1 \cdot 10^7} \quad (1.24)$$

— коэффициент использования машины,  $\frac{\text{Вт}}{\text{мм}^3 \cdot \text{об/мин}}$ .

Расчетная мощность, Вт:

- для двигателей постоянного тока

$$P' = E_2 I_2 = k_H U I k_T = \frac{k_H k_T P_2}{\eta}; \quad (1.25)$$

- для генераторов постоянного тока

$$P' = E_2 I_2 = k_H U k_T I = k_H k_T P_2, \quad (1.26)$$

где  $U$  и  $I$  — напряжение, В, и ток, А, сети;  $k_H = E_2/U$ ;  $k_T = I_2/I$ .

Отношение  $P'/n$  пропорционально расчетному вращающему моменту  $M'$ . Следовательно, машинная постоянная  $C_A$  в формулах (1.9), (1.14) и (1.23) пропорциональна объему сердечника, приходящемуся на единицу момента вращения, а коэффициент использования  $K_A$  в формулах (1.10), (1.15) и (1.24) — расчетному

моменту вращения, приходящемуся на единицу объема сердечника. Чем меньше значения  $C_A$  или чем больше значение  $K_A$ , тем меньше размеры сердечника статора или якоря и тем выше использование машины.

Значения  $k_{об1}$  для машин переменного тока и машин постоянного тока изменяются в достаточно узких пределах, поэтому при заданных мощностях и частоте вращения объем сердечника машины зависит в основном от электромагнитных нагрузок. Чем больше значения  $A_1$ ,  $A_2$  и  $B_8$ , тем меньше главные размеры и выше использование активных материалов в машине. Однако увеличение электромагнитных нагрузок, сопровождаемое повышением температуры активных частей машины, ограничивается классом нагревостойкости изоляции. При выборе электромагнитных нагрузок следует также учитывать, что отношение  $A/B_8$  должно быть в определенных пределах, так как его значение влияет на технико-экономические показатели машин переменного тока — КПД,  $\cos \varphi$ , пусковые характеристики и массу, а в машинах постоянного тока — КПД, регулировочные свойства, коммутационные показатели и массу машины.

В гл. 9 и 11 для машин переменного тока и в гл. 10 для машин постоянного тока приведены рекомендуемые значения  $A$  и  $B_8$  из опыта современного электромашиностроения.

Одно и то же значение  $D_1^2 l_1$  для машин переменного тока или  $D_{н2}^2 l_2$  для машин постоянного тока может быть получено при различных значениях  $D$  и  $l$ , а следовательно, при разных отношениях  $\lambda = l/D$ . Отношение  $l/D$  влияет на массу, динамический момент инерции вращающейся части, энергетические и другие технико-экономические показатели машины. Это влияние может быть различным и порой противоречивым, например при увеличении  $\lambda$ , т. е. при уменьшении значений  $D$  и увеличении  $l$  снижается динамический момент инерции, ускоряется процесс пуска и торможения двигателя и соответственно снижаются потери, возникающие при этом процессе. При увеличении  $\lambda$  уменьшаются масса лобовых частей обмоток и потери в них. Следовательно, у машин с большими значениями  $\lambda$  масса, приходящаяся на единицу мощности или момента вращения, снижается, а КПД растет.

Вместе с тем у вентилируемых машин с большими значениями  $\lambda$  ухудшаются условия охлаждения и может возникнуть необходимость в увеличении диаметра вала для обеспечения его достаточной жесткости и прочности. При достижении больших значений  $\lambda$  может возрасти трудоемкость изготовления, а следовательно, и себестоимость машины.

Выбор значения отношения  $l/D$  не является однозначной задачей; ее решению способствуют установленные практикой рациональные пределы максимальных значений  $\lambda_{max}$ . Эти значения для асинхронных двигателей приведены в табл. 9.7, для машин

постоянного тока — на рис. 10.7, для синхронных машин — на рис. 11.10.

Поскольку ряд высот оси вращения  $h$  стандартизован, то проектирование выполняют двумя способами.

*Способ первый.* С выбором максимального допускаемого диаметра сердечника  $D_{н\max}$ . Такая машина может не быть оптимальной по своим технико-экономическим показателям, но будет иметь предельно допускаемую мощность (при выбранном  $h$ ). В практике современного электромашиностроения наблюдается тенденция максимального снижения высоты оси вращения электродвигателей  $h$  при заданных мощности  $P_2$ , частоте вращения  $n$ . Основной причиной этого являются большие удобства потребителей при соединении электродвигателей с приводимыми механизмами, имеющими меньшие габаритные размеры, чем электродвигатели, а также при встраивании электродвигателей в станки и другие механизмы. Уменьшение высоты оси вращения снижает механическую инерционность роторов и якорей, а следовательно, повышает динамические свойства двигателей. Указанная тенденция снижения  $h$  распространяется также на генераторы.

Учитывая, что уменьшение значения  $h$  при заданных значениях  $P_2$  и  $n$  увеличивает длину машины, причем  $\lambda$  может выйти за допустимые рациональные пределы, следует при выбранной стандартной высоте оси вращения  $h$  проектировать машины с наибольшим допустимым наружным диаметром корпуса  $D_{\text{корп}}$ , обеспечивающим минимально допустимое расстояние  $h_1$  от нижней части корпуса машины до опорной плоскости лап (рис. 1.1). Если при этом значение  $\lambda$  будет мало, следует переходить на ближайшую меньшую, а при высоких значениях  $\lambda$  — на ближайшую большую

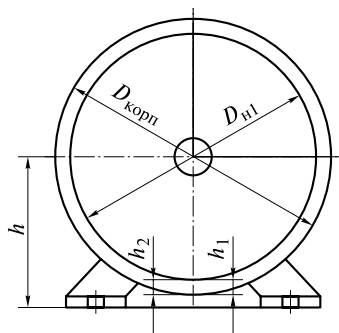


Рис. 1.1. Определение значений  $D_{\text{корп}}$  и  $D_{н1}$  машин переменного и постоянного тока с шихтованным сердечником статора

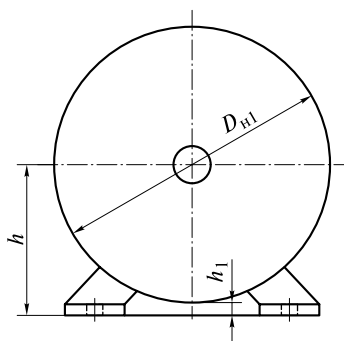


Рис. 1.2. Определение значений  $D_{н1}$  машин постоянного тока с монолитной станиной

стандартную величину  $h$ . Этот способ проектирования не требует расчетных вариантов.

*Способ второй.* С выбором диаметра сердечника  $D_{\text{н}}$ , обеспечивающим оптимальные технико-экономические показатели машины (см. гл. 7 и 8). Этот способ проектирования требует расчета либо на ЭВМ, либо «ручного» расчета ряда вариантов с различными значениями  $D_{\text{н}}$ . При расчетах должно обеспечиваться условие  $D_{\text{н}} \leq D_{\text{нmax}}$ . Расчеты показали, что разница в технико-экономических показателях оптимального варианта и машины с  $D_{\text{нmax}}$  относительно невелика. Поэтому в настоящей книге этот способ рассматривается как основной вариант расчета машин с  $D_{\text{нmax}}$ .

Максимально допустимый наружный диаметр корпуса, мм, определяют по формуле

$$D_{\text{корп}} = 2(h - h_1). \quad (1.27)$$

Значения  $h$  и  $h_1$  приведены в табл. 1.1 и 1.3. Для машин *переменного тока*, у которых сердечник статора заключен в литую станину, максимально допустимый наружный диаметр сердечника статора, мм,

$$D_{\text{н1}} = D_{\text{корп}} - 2h_2 = 2(h - h_1 - h_2), \quad (1.28)$$

где  $h_2$  — высота (толщина) стенки станины, мм (при радиальной системе вентиляции размер  $h_2$  представляет собой сумму несколько уменьшенной высоты стенки станины и высоты ребра, к которому примыкает наружная поверхность сердечника (см. гл. 3)).

Для машин *постоянного тока* с монолитной станиной (рис. 1.2), являющейся частью магнитопровода, максимально допустимый наружный диаметр, мм,

$$D_{\text{н1}} = D_{\text{корп}}. \quad (1.29)$$

При выполнении машин постоянного тока с шихтованной станиной наружный диаметр  $D_{\text{н1}}$  определяют по формуле (1.28). Значения  $h_1$  и  $h_2$  представлены на рис. 1.3. Внутренний диаметр сердечника статора  $D_1$  и наружный диаметр сердечника якоря  $D_{\text{н2}}$  находятся в определенных соотношениях с  $D_{\text{н1}}$ , зависящих от числа главных полюсов машины  $2p$  и диаметра  $D_{\text{н1}}$ . Усредненные зависимости  $D_1 = f(D_{\text{н1}})$  приведены в табл. 9.4 и в подразд. 11.3, а  $D_{\text{н2}} = f(D_{\text{н1}})$  — на рис. 10.1.

После выбора  $D_1$  или  $D_{\text{н2}}$  по формуле (1.13) определяют расчетную длину сердечника статора асинхронного двигателя, мм,

$$l'_1 = \frac{8,62 \cdot 10^7 P'}{D_1^2 n_1 A_1 B_8 k_{\text{об1}}}, \quad (1.30)$$

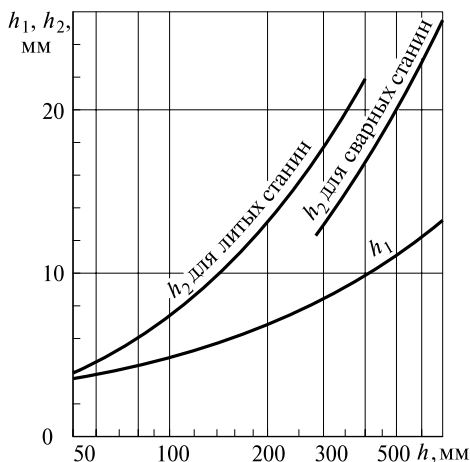


Рис. 1.3. Зависимость значений  $h_1$  и  $h_2$  от значения  $h$

по формуле (1.7) — расчетную длину сердечника синхронной машины, мм,

$$l'_1 = \frac{6,1 \cdot 10^7 P'}{D_1^2 n_1 A_1 B_\delta \alpha' k_\phi k_{\text{обл}}}, \quad (1.31)$$

а по формуле (1.21) — расчетную длину сердечника якоря машины постоянного тока, мм,

$$l'_2 = \frac{6,1 \cdot 10^7 P'}{D_{H2}^2 n A_2 B_\delta \alpha'}. \quad (1.32)$$

Конструктивную длину сердечника статора  $l_1$  или сердечника якоря  $l_2$  при отсутствии в сердечнике радиальных вентиляционных каналов принимают равными расчетным длинам  $l'_1$  или  $l'_2$ . При наличии радиальных вентиляционных каналов

$$l_1 = l'_1 + n_{k1} l_{k1}; \quad (1.33)$$

$$l_2 = l'_2 + n_{k2} l_{k2}, \quad (1.34)$$

где  $n_k$  — число каналов;  $l_k$  — длина (ширина) каналов.