

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

УЧЕБНИК ДЛЯ БАКАЛАВРОВ

4–е издание, переработанное и дополненное

Под редакцией профессора И. П. Копылова

*Допущено Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебника для студентов электромеханических
и электроэнергетических специальностей вузов*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2014

УДК 621.313
ББК 31.261я73
П79

Авторы:

Копылов Игорь Петрович, Клоков Борис Константинович, Морозкин Виктор Павлович, Токарев Борис Федорович.

Рецензент:

Гольдберг О. Д. — профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и аппараты» Московского государственного открытого университета.

Проектирование электрических машин : учебник для бакалавров / под ред. И. П. Копылова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2014. — 767 с. — Серия : Бакалавр. Углубленный курс.

ISBN 978-5-9916-1848-9

Рассмотрены электромагнитные, тепловые, вентиляционные и механические расчеты асинхронных, синхронных машин и машин постоянного тока. Приведены примеры расчетов электрических машин новых серий. Даны необходимые справочные материалы для выполнения курсовых и дипломных проектов.

В четвертом издании (3-е — 2002 г.) приведены материалы по новым сериям электродвигателей.

Соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования третьего поколения.

Для студентов электротехнических и энергетических специальностей. Может быть полезен инженерам, специализирующимся в области проектирования и эксплуатации электрических машин.

УДК 621.313
ББК 31.261я73

ISBN 978-5-9916-1848-9

© Коллектив авторов, 2002
© Коллектив авторов, 2011,
с изменениями
© ООО «Издательство Юрайт», 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Без преувеличения можно считать, что в XX в. электричество совершило техническую революцию в промышленности. Почти вся электроэнергия вырабатывается электрогенераторами, две трети которой преобразуется электродвигателями в механическую энергию. Поэтому электромеханики могут гордиться тем, что их детища — электрические машины являются главными движущими силами технического прогресса.

Проектирование электрических машин требует глубоких, профессиональных знаний не только в электромеханике, но и в теплотехнике, механике и экономике. Данный учебник написан для студентов-электромехаников, изучающих курс «Проектирование электрических машин», а также для студентов других специальностей, выполняющих курсовой проект по электрическим машинам. В первых восьми главах излагается лекционный материал, а в последующих — необходимый для выполнения курсовых проектов по асинхронным, синхронным машинам и машинам постоянного тока.

В книге нет материалов по специальным электрическим машинам, турбо- и гидрогенераторам.

Учебник написан сотрудниками кафедры «Электромеханики» Московского энергетического института (ТУ). К сожалению, из авторов третьего издания учебника в живых остался только один, и ему пришлось весь труд по переизданию принять на свои плечи и постараться в тексте сохранить индивидуальные особенности своих коллег.

Учебник предназначен для студентов, но может быть полезен инженерам-электромеханикам в практической работе.

Двигатели серии АИР соответствовали нормам СЭВ, отличным от требований Европейского комитета по координации электротехнических стандартов (SENELEC) и стандартов ФРГ (DIN). До последнего времени на электротехнических заводах России выпускались в основном асинхронные двигатели серий 4А и АИР.

В настоящее время Владимирский электромоторный завод (ВЭМЗ) освоил выпуск серии 5А, заменившей серию АИ. В серии 5А сохранена конструктивная и технологическая преемственность серии АИ.

Ярославский электромашиностроительный завод (ЯЭМЗ) освоил производство серии РА (Российская асинхронная) с высотой оси вращения 71...280 мм.

Более подробные данные о сериях RA и 5A приведены в разделе «Проектирование асинхронных машин».

Автор благодарит рецензента профессора кафедры «Электрических машин и аппаратов» Московского государственного университета О.Д. Гольдберга за ценные замечания.

Профессор Копылов И. П.

ВВЕДЕНИЕ

Электротехническая промышленность, несмотря на все трудности послеперестроечного периода, остается ведущей отраслью промышленности России. Электрические машины используются во всех промышленных, сельскохозяйственных, военных и бытовых установках. Поэтому качество электротехнических изделий во многом определяет технический уровень продукции других отраслей.

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

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 едиными сериями. Только асинхронных двигателей единых серий изготавливают несколько миллионов штук в год.

Серии электрических машин сменялись в течение 7—12 лет. 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.

После распада СССР в России осталась, примерно, половина мощности электротехнических заводов. В начале девяностых годов XX в. целый ряд типоразмеров электрических машин в России не выпускался. Если раньше на одном заводе выпускались машины двух-трех высот оси вращения и была высокая автоматизация производства, то в последние годы электромашиностроительные заводы нашей страны освоили широкую номенклатуру машин и принимают заказы практически на любые машины, соответствующие возможностям производства.

Все это потребовало новых подходов к проектированию электрических машин — значительно сократить сроки предпроизводственной подготовки и несколько изменить технологию.

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.

При проектировании индивидуальной машины или небольшой серии критерий оптимизации согласовывается с заказчиком.

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 применяются 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.

Данный учебник научит рассчитывать электрическую машину, применяя традиционные средства вычислительной техники. В книге по каждому типу машин даны примеры расчета, которые можно выполнить с применением мини-ЭВМ.

Учебник не может охватить все данные, необходимые для расчета и конструирования электрической машины, поэтому предполагается, что читатель при выполнении проекта будет пользоваться справочниками, электротехническими журналами, каталогами и атласами чертежей.

Глава первая. Общие вопросы проектирования электрических машин

Электрические машины применяют во всех отраслях промышленности, в сельском хозяйстве и в быту. Их выпускают большими сериями и в индивидуальном исполнении. Во многих случаях электрические машины определяют технический уровень изделий, в которых они используются в качестве генераторов и двигателей. Проектирование электрических машин требует глубоких знаний и высокого профессионального мастерства.

1.1. ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Впервые электрические машины получили применение в промышленности более ста лет назад. Тогда же появились и первые рекомендации по их расчету. В конце XIX в. в Европе и Америке появились крупные электротехнические фирмы «Сименс», «Вестингауз», АЭГ и другие, на которых сложились крупные конструкторские и расчетные отделы. В это же время начинают издаваться первые электротехнические журналы. В России журнал «Электричество» начал издаваться в 1880 г.

В России первые электротехнические заводы появились в начале XX в. Это «Электросила» в С.-Петербурге, «Динамо» в Москве и заводы в Харькове и Таллине. В годы первых пятилеток Москва, Ленинград и Харьков превратились в крупные производственные центры электропромышленности. После Великой Отечественной войны электротехническая промышленность развивалась бурными темпами, и в настоящее время крупные центры электромашиностроения есть в десятках городов СНГ. Около пятидесяти кафедр высших учебных заведений выпускают специалистов по электрическим машинам.

Первые фундаментальные работы по расчетам и проектированию электрических машин появились в конце десятих — начале двадцатых годов XX в. Это были книги Э. Арнольда, М. Видмара, А. Ла-Кура, Р. Рихтера, К.И. Шенфера, В.С. Кулебакина и др. [5].

Первыми отечественными трудами по проектированию были книги А.Я. Бергера, П.П. Копняева, В.А. Пантелеева и Ф.И. Холуянова. Большой вклад в проектирование электрических машин внесли работы ученых А.Е. Алексеева, Б.П. Апарова, А.И. Вольдека, В.Т. Касьянова, М.П. Костенко, Б.И. Кузнецова, Р.А. Лютера, Г.Н. Петрова, И.М. Постникова, П.С. Сергеева, Т.Г. Сорокера, В.А. Тралезникова и др. [5].

Проектирование электрической машины — сложная многовариантная задача. При ее решении приходится учитывать большое количество факторов. Естественным стремлением всех, кто проектирует машину, является получение, по возможности наиболее быстрым путем, более близкого к заданию расчетного варианта. Поэтому методики, подход к расчету и проектированию электрических машин на всех этапах развития включали все новейшие достижения в теории и практике электромашиностроения.

Большинство расчетных методик исходит из так называемой «машинной постоянной», определяемой из допустимых электромагнитных нагрузок.

Машинная постоянная Арнольда записывается в виде:

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta \Omega}{P'} = \frac{2}{\pi a_\delta k_B k_{об} A B_\delta}, \quad (1.1)$$

где D — диаметр якоря машины постоянного тока или внутренний диаметр статора, м; l_δ — расчетная длина магнитопровода, м; Ω — угловая скорость, рад/с; P' — расчетная мощность, ВА; A — линейная нагрузка, А/м; B_δ — индукция в воздушном зазоре, Тл; a_δ — коэффициент полюсного перекрытия; k_B — коэффициент формы кривой индукции, учитывающий изменение напряжения на выводах машины при холостом ходе и нагрузке; $k_{об}$ — обмоточный коэффициент.

Определив $C_A = f(P')$ для различных типов электрических машин, можно получить базу для их расчетов. Машинная постоянная не является константой и зависит от электромагнитных нагрузок, напряжения, типа изоляции, системы охлаждения, стоимости материалов, надежности работы машины, суммы капитальных и эксплуатационных затрат и других факторов.

Ученые в разное время по-своему интерпретировали машинную постоянную. Эссон в 20-х годах XX в. предложил при проектировании применять коэффициент использования машины — момент на единицу объема, по существу, величину, обратную постоянной Арнольда.

Машинная постоянная Рихтера есть момент, отнесенный к единице поверхности якоря. В машинной постоянной Шенфера вместо внутреннего диаметра статора используется внешний диаметр.

В 1926 г. В.С. Кулебакин при выборе главных размеров синхронных машин учитывал токи короткого замыкания. В 1934 г. Б.П. Апаров для синхронных машин предложил при выборе главных размеров исходить из необходимой кратности пускового и максимального моментов.

Г.Н. Петров вводит понятия единичной машины и касательной силы, действующей на единицу поверхности ротора. Касательная сила зависит от мощности машины, но даже у самых крупных машин не превышает 0,03...0,04 МПа.

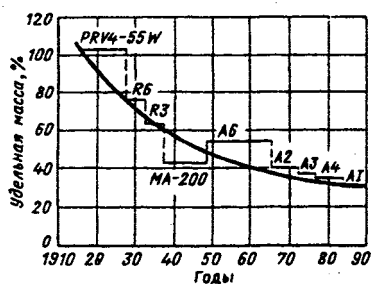


Рис. 1.1. Снижение массы асинхронных двигателей в XX в.

уровень электрических машин. По сравнению с 1913 г. масса асинхронных двигателей современных серий снижена более чем в 3 раза (рис. 1.1). Наиболее значительное снижение массы было достигнуто в 1920...1950 гг. Предполагается, что в 2005...2010 гг. сокращение массы может составить не более 4—5 %. В дальнейшем будет еще труднее обеспечить снижение массы при практически неизменном уровне энергетических показателей электрической машины. Даже небольшой процент сокращения расхода активных материалов потребует серьезных работ по усовершенствованию конструкции, технических свойств изоляционных и магнитных материалов. Снижение металлоемкости необходимо, так как выпуск машин единых серий постоянно увеличивается.

Удельный расход материалов в турбогенераторах с 1952 г. снизился более чем в 3 раза. Турбогенератор на 150 тыс. кВт с водородным охлаждением имел массу 350 т. Турбогенератор ТВВ-1200-2 имеет массу на единицу мощности, равную 0,457 кг/(кВ·А).

Значительный рост цен на медь приводит к повышению цены на обмоточные провода. Поэтому реальной становится проблема замены медных обмоточных проводов на ферромагнитные (стальные) провода, имеющие активное сопротивление в десять раз больше, чем медные. Однако хорошие магнитные свойства и увеличение сечения проводов делают реальным замену медных обмоточных проводов на ферромагнитные при сохранении энергетических характеристик двигателей при некотором увеличении их габаритов.

Проектирование новых электрических машин со стальными обмотками потребует сосредоточить усилия и талант многих коллективов инженеров-электромехаников. Вполне реальна замена меди в общепромышленных сериях электрических машин мощностью до 5 кВт, так как в этом диапазоне мощности электротехническая промышленность потребляет свыше 50 % меди [6].

Как следует из формулы (1.1), размеры машины зависят от индукции в воздушном зазоре B_8 и линейной нагрузки A .

При рассмотрении электрической машины как объекта разработки необходимо учитывать объем и длительность проектных, расчетных и технологических работ. Предпроизводственные работы включают изготовление рабочих чертежей, технологической оснастки и опытных образцов.

Этот этап требует достаточно много времени и больших коллективов конструкторов и технологов. Качество разработки проекта определяет судьбу электрической машины в производстве и эксплуатации.

Электрическая машина как объект производства должна иметь минимальную трудоемкость и минимальные капитальные вложения в производство. Для этого необходимы технологичная конструкция и максимальное использование существующего технологического оборудования и оснастки.

С каждым годом повышается механизация и автоматизация электромашиностроительных заводов. Используются станки для механизированной укладки обмотки статоров и якорей электрических машин, применяются высокопроизводительные штампы и прессы. Для сборочных работ используются роботы, для изготовления валов и станин применяются автоматизированные линии. В ближайшие годы на заводах будут использоваться гибкие автоматизированные комплексы. При проектировании машины необходимо учитывать особенности производства, на котором предполагается изготовление машины.

После распада СССР более 43 % производственных мощностей по выпуску электрических машин остались за границей, в странах СНГ. Россия лишилась целого ряда габаритов асинхронных двигателей с высотами оси вращения 63, 71, 80, 90, 200, 222 и 250 мм. В то же время заводы столкнулись с резким спадом спроса на выпускаемую продукцию. Все это потребовало структурной перестройки российских электромашиностроительных предприятий.

Если раньше завод производил асинхронные двигатели одной-двух высот вращения, то теперь потребовалось, например Ярославскому электромашиностроительному заводу ОАО ЯЭМЗ, выпускать двигатели всех модификаций от 0,30 до 100 кВт, Владимирскому электромоторному заводу ВЭМЗ — от 0,1 до 1250 кВт.

Сложившиеся условия потребовали от инженеров-электромехаников новых подходов к проектированию и организации производства электрических машин. Значительно сократились сроки проектирования и подготовки производства небольших, но многообразных модификаций серий электрических машин. Если раньше электромашиностроители диктовали условия для потребителей, то теперь заказчик определяет номенклатуру изделий. Многообразие типов и модификаций машин снизило возможности автоматизации производства и поставило на первый план технологические возмож-

ности быстрого перехода к выпуску мелких партий электрических машин [13].

Важнейшим требованием при производстве является минимальная материалоемкость электрических машин. Экономия электротехнической стали, меди, алюминия, изоляции и конструкционных материалов является важнейшим требованием при создании новой электрической машины.

Экономия материалов связана с безотходной и малоотходной технологией. При штамповке листов стали статора и ротора в среднем 40 % стали идет в отходы, а в некоторых случаях 60...70 %. В машинах малой мощности за счет изменения конструкции и технологии изготовления магнитной системы можно значительно уменьшить отходы электротехнической стали [2].

Электрические машины с безотходной технологией изготовления имеют преимущества перед обычными машинами, если сохраняются и требования к машине как к объекту эксплуатации.

Как объект эксплуатации электрическая машина должна иметь высокие энергетические показатели (КПД и $\cos\phi$). Электрические машины с минимальными потерями позволяют уменьшить вложение материалов в энергосистему. Высокие энергетические показатели электрической машины гарантируют снижение уровня текущих затрат на эксплуатацию и капитальные вложения потребителя.

Улучшение энергетических показателей электрических машин стало особенно актуальным в связи с ростом цен на энергоносители. Вновь разрабатываемые электрические машины должны соответствовать высшей категории качества. Они должны быть надежными и, как правило, иметь срок службы 8...10 лет.

Показатели экономической эффективности электрической машины могут быть установлены на основании анализа приведенных затрат, которые включают затраты на изготовление и эксплуатацию машины.

1.2. ПРОБЛЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

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. Оптимальное проектирование электрических машин можно представить как поиск оптимальных параметров путем решения этой системы уравнений.

Выбор оптимальных параметров затрудняется сложностью алгоритма расчета электрической машины по формулам проектирования. При проектировании необходимо учитывать стоимость машины, надежность и технологичность конструкции. Эти показатели

косвенно входят в формулы проектирования, что затрудняет оптимизацию. Оптимальные варианты электрической машины выбираются на основании широкого применения вычислительных машин, опыта и интуиции проектировщика [1].

Анализ приведенных затрат применительно к асинхронным двигателям единой серии до 10 кВт показал, что примерно 70 % затрат составляют текущие расходы на их эксплуатацию. На долю капиталовложений приходится лишь 15...20 % всех затрат. Следовательно, повышение эффективности новых электрических машин связано прежде всего со снижением эксплуатационных расходов. Первоочередное значение здесь имеют повышение надежности работы машин и улучшение их энергетических показателей, при этом повышение КПД экономически более выгодно, чем повышение $\cos\varphi$.

Повышение надежности и улучшение КПД должны достигаться без заметного увеличения затрат на изготовление электрической машины. Сокращение расходов на электротехническую сталь и обмоточные провода может дать существенное уменьшение себестоимости электрической машины.

Хотя основная заработная плата и составляет 5...8 % себестоимости, снижение трудоемкости механических и обмоточно-изоляционных работ имеет важное значение. В свое время в связи с увеличением выпуска электрических машин и недостатком рабочей силы снижение трудоемкости было настолько важно, что в серии 4А пошли на некоторое снижение энергетических показателей, увеличив размеры шлица пазов для возможности машинной намотки обмотки. Проектирование электрических машин неотделимо от конструирования и технологии изготовления, связанных с условиями, переживаемыми государством.

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 разбега асинхронного двигателя надо увеличивать активное сопротивление обмотки ротора, что вы-

зывает ухудшение энергетических показателей в установившемся режиме.

Выбор критерия оптимизации электрической машины, работающей в автономной энергетической системе, обычно отличается от выбора критерия оптимизации машин общего назначения. Машины автономных энергетических систем в большинстве случаев оптимизируются по минимуму массы, а в передвижных энергетических системах — по минимуму общей массы электрооборудования системы. Если электрическая машина работает при неизменном напряжении, приложенном к ее выводам и не зависящем от нагрузки (сеть бесконечной мощности), задачу оптимизации машины следует проводить по минимуму суммарных затрат.

Задача оптимального проектирования электрической машины или серии машин может быть представлена как общая задача нелинейного математического программирования, которая сводится к нахождению минимума или максимума критерия оптимальности при наличии определенного числа независимых переменных проектирования и функций лимитеров, представляющих собой технические или технологические требования-ограничения к проекту [1, 10].

Применение ЭВМ при проектировании для расчетов электрических машин началось в начале 50-х годов XX в. Во ВНИИЭМ ЭВМ использовались для расчетов серий асинхронных машин. В настоящее время ни один расчет электрических машин не обходится без применения ЭВМ. В большинстве случаев ЭВМ используются для расчетов отдельных частей или всей электрической машины по существующим методикам, что обеспечивает ускорение вычислений, перебор многих вариантов, дает возможность в короткие сроки создать оптимальную электрическую машину.

Внедрение ЭВМ в проектирование привело к существенному повышению технико-экономических показателей электрических машин, снижению сроков проектирования, обеспечило качественный сдвиг в решении задач оптимального проектирования.

При проектировании электрических машин применяются в основном цифровые ЭВМ. Аналоговые ЭВМ удобно применять при решении задач динамики. Недостатками их являются ограниченный объем решаемой задачи и малая универсальность. Цифровые ЭВМ лишены этих недостатков, однако они требуют трудоемкого программирования. Чтобы избежать излишних потерь времени, целесообразно создавать универсальные программы и хранить их в банках данных.

В настоящее время решается задача комплексной автоматизации проектирования электрических машин. Этой цели служит система автоматизированного проектирования электрических ма-

шин (САПР ЭМ). Однако на заводах и НИИ используются свои программы, отличающиеся друг от друга и появившиеся в разное время.

Широкая автоматизация проектных работ изменит в ближайшие годы процесс проектирования электрических машин, произойдут значительные изменения и в учебном проектировании. В гл. 12 дано описание САПР ЭМ. Данный учебник рассчитан на применение частных программ и мини-ЭВМ, так как пока еще не накоплен достаточный опыт промышленного автоматического проектирования электрических машин, а без использования классических формул проектирования невозможно заниматься и использовать САПР ЭМ.

1.3. РАСЧЕТ ОТДЕЛЬНОЙ МАШИНЫ И СЕРИИ МАШИН

Электрические машины концентрируют энергию магнитного поля в воздушном зазоре. Объем активной части — пространство, в котором размещены сердечники и пазовые части обмоток, определяется произведением Dl_δ (1.1). Размеры D и l_δ называются главными размерами машины.

Расчетная мощность машины

$$P' = m I_{\text{ном}} E, \quad (1.2)$$

где $I_{\text{ном}}$ и E — соответственно номинальный ток и ЭДС обмотки статора для асинхронных и синхронных машин, а для машин постоянного тока — номинальный ток и ЭДС якоря; m — число фаз для машин переменного тока (для машин постоянного тока $m = 1$).

Отношение

$$p_{\text{уд}} = P' / (D^2 l_\delta) \quad (1.3)$$

определяет удельную мощность машины, т. е. мощность на единицу активной части. Удельная мощность характеризует степень использования материалов активной части и является важным показателем для сравнения машин различной мощности и конструктивного исполнения.

Более общим критерием оптимизации является отношение момента, развиваемого машиной, к объему ее активной части, которое называют коэффициентом использования

$$k_{\text{и}} = \frac{P' / \Omega}{D^2 l_\delta} = \frac{M}{D^2 l_\delta}. \quad (1.4)$$

Здесь Ω — угловая скорость ротора, а P' / Ω — момент на валу машины, нм; D — диаметр (внутренний или внешний), см; l_δ — расчетная длина машины, см.

Эффективность использования объема активной части машины определяется электромагнитными нагрузками, линейной нагрузкой

A и индукцией в воздушном зазоре B_δ . Линейная нагрузка определяется отношением тока всех витков обмотки к длине окружности. Ее значение показывает, какой ток приходится в среднем на единицу длины окружности зазора машины. Индукция в воздушном зазоре при данных диаметре по зазору и числе полюсов определяет поток машины и, следовательно, уровень индукции в участках магнитопровода.

Чем больше A и B_δ , тем больше коэффициент использования объема активной части $k_a \sim AB_\delta$. Однако с ростом мощности машины k_a увеличивается. Это объясняется тем, что с увеличением объема активной части площадь, с которой отводится тепло, увеличивается быстрее, чем объем машины. Если объем машины пропорционален линейному размеру в третьей степени, то поверхность этого объема пропорциональна линейному размеру в четвертой степени.

Лучшие условия охлаждения в машинах большой мощности позволяют выбирать большие A и B_δ , что обеспечивает лучшее использование материалов. Поэтому машинная постоянная C_A остается «постоянной» лишь в определенном диапазоне мощностей. С повышением мощности машины растет и C_A .

Наибольшие допустимые уровни электромагнитных нагрузок для конкретных машин определяются допустимым нагревом активных частей, так как с ростом A и B_δ увеличиваются потери в единице активного объема машины. На основании опыта проектирования и эксплуатации электрических машин выработаны определенные диапазоны возможных значений A и B_δ для различных типоразмеров машин, при которых нагрев их активных частей не превышает допустимого для принятого класса изоляции обмоток. Значения электромагнитных нагрузок задаются в виде рекомендаций в соответствующих расчетных методиках и служат основой для правильного выбора объема активной части. С развитием теории и практики электромашиностроения коэффициент использования объема активной части машин повышается.

Переход на более нагревостойкую изоляцию позволяет рассчитать машины на большие превышения температуры обмоток, что дает возможность при той же мощности уменьшить габариты машины.

То же самое происходит, если в машине применена более совершенная система охлаждения — водородная, жидкостная, форсированные системы или внутреннее охлаждение. В этих случаях при том же превышении температуры способность рассеивать тепло также возрастает и объем активной части машины может быть уменьшен. Однако при слишком больших нагрузках значительно снижаются КПД и $\cos\varphi$ [6].

Использование новых сортов электротехнических сталей с лучшими магнитными свойствами и меньшими удельными потерями и

новых электроизоляционных материалов, позволяющих уменьшить толщину изоляции и за счет этого снизить плотность тока в обмотках, приводит к уменьшению потерь и необходимого объема активной части.

Поиски новых конструктивных решений, применение вычислительных машин, новых методов оптимизации, обобщение опыта проектирующих организаций позволяют создавать электрические машины с лучшими энергетическими характеристиками и меньшей массой.

За счет применения новых электроизоляционных и магнитных материалов, совершенствования конструкции и систем охлаждения, развития теории и применения ЭВМ удалось снизить массу электрических машин общего назначения в 2—3 раза (см. рис. 1.1).

При проектировании новых машин и, в частности, при выполнении учебных проектов необходимо ориентироваться на современное конструктивное исполнение электрических машин, предусматривать применение новых электротехнических материалов.

Ориентируясь на рекомендованные в методиках значения электромагнитных нагрузок и используя выражение для машинной постоянной, можно достаточно точно найти объем активной части проектируемой машины D^2l_s , при котором ее превышение температуры будет соответствовать допустимому. Однако этот объем может быть получен при различных сочетаниях значений D и l_s . Аналитических зависимостей, однозначно определяющих эти величины для конкретных машин, не существует. В практике проектирования предварительно определяют диаметр D . Для этой цели обычно используют кривые, характеризующие среднюю зависимость $D = f(P/n)$ для большого числа построенных и эксплуатируемых машин данного типа (где P — мощность машины). После этого с учетом выбранных электромагнитных нагрузок определяют l_s , исходя из машинной постоянной.

Проверкой правильности выбора D является значение отношения l_s/D или более часто принятое в практике отношение $\lambda = l_s/\tau$, где полюсное деление $\tau = \pi D/2p$. Число полюсов обычно известно или определяется из технического задания.

Значение λ характеризует основные размерные соотношения в машине. Большие λ имеют машины относительно малого диаметра и большой длины, и, наоборот, малые значения λ — короткие машины с большим диаметром. В первом случае машины имеют меньшую массу и меньшую высоту оси вращения. В них лучше используется медь, так как длина лобовых частей катушек по сравнению с длиной их пазовых частей становится меньше. Момент инерции машин меньше при больших λ , чем при малых λ , что особенно важно при проектировании двигателей, предназначенных для работы с частыми пусками.