

**А. В. НОВИКОВ,
Н. Г. ПОПОВИЧ,
И. М. ПОСТНИКОВ,
Л. А. РАДЧЕНКО**

ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

Электрические машины, электропривод и автоматизация промышленных установок

*Допущено Министерством высшего
и среднего специального образования УССР
в качестве учебного пособия
для студентов вузов,
обучающихся по специальностям
«Электрические машины»,
и «Электропривод и автоматизация
промышленных установок»*

КИЕВ
ГОЛОВНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ
«ВИЩА ШКОЛА»
1981

ББК 31.261я73
6П2.1.081
В24

УДК 621.3+658(07)

Введение в специальность. Электрические машины, электропривод и автоматизация промышленных установок. Новиков А. В., Попович Н. Г., Постников И. М., Радченко Л. А. — Киев: Вища школа, Головное изд-во, 1981, 192 с.

Рассмотрены основные законы электромеханики, классификация и конструкция электрических машин, основы электропривода и применение его в народном хозяйстве, перспективы развития электромеханики, а также краткая история развития энергетики.

Учебное пособие для студентов специальностей «Электрические машины» и «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

Табл. 10 Ил. 57 Библиогр.: 21 назв.

Рецензенты: кафедра электрических машин, электропривода и автоматизация промышленных установок Львовского политехнического института (зав. кафедрой В. Т. Бардачевский) и канд. техн. наук Р. А. Дашевский.

Редакция литературы по кибернетике, электронике и энергетике

Зав. редакцией *М. С. Хойнацкий*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Научно-технический прогресс обуславливает необходимость постоянного совершенствования и обновления студентом своих знаний. Поэтому умение самостоятельно работать должно воспитываться у молодого специалиста в период обучения его в институте.

Молодые люди, только пришедшие в институт, в большинстве случаев не могут правильно оценить общего уровня развития избранной ими отрасли науки и техники. Поэтому предлагаемое пособие и должно помочь будущему специалисту увидеть взаимосвязь различных отраслей науки и техники, диалектику развития и становления избранной специальности.

Деятельность инженера многогранна, столь же разнообразны и требования, которые к нему предъявляются. Инженер должен обладать научной и технической подготовкой, позволяющей решать конкретные технические задачи и широко внедрять новейшие достижения науки в народное хозяйство. Как руководитель производственного коллектива инженер должен сознательно оценивать экономические и политические результаты своей деятельности и деятельности всего коллектива, иметь активную жизненную позицию.

Основное условие успеха в учебе — личная в ней заинтересованность. Следовательно, развитие умственных способностей студента зависит не столько от качества преподавания, сколько от решимости и целеустремленности самого студента. Вот почему так важно в процессе обучения не терять веру в свои творческие возможности и не удовлетворяться посредственными результатами.

В Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года большое внимание уделено развитию электро-

Энергетики и энергетического машиностроения, в частности планируется значительно увеличить производство турбогенераторов, комплексов электрооборудования, сталеплавильных электропечей, высокомоментных электродвигателей, силовой полупроводниковой преобразовательной техники. Особое внимание будет уделено разработке и освоению выпуска электротехнического оборудования с высоким коэффициентом полезного действия, меньшим удельным расходом цветных металлов и других материалов.

Цель книги — помочь студентам сориентироваться в своей будущей специальности, ознакомить их с историей и перспективами ее развития, дать рекомендации по организации учебы в институте.

Учебное пособие написано на основании опыта преподавания курса «Введение в специальность» на кафедрах «Электрические машины» и «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Киевского политехнического института. Введение и главы 1, 2 написаны И. М. Постниковым, глава 3 — А. В. Новиковым, глава 4 — Л. А. Радченко, глава 5 — Н. Г. Поповичем, главы 6 и 7 — А. В. Новиковым и Н. Г. Поповичем.

Замечания и отзывы по книге просим направлять по адресу: 252054, Киев-54, ул. Гоголевская, 7, Головное издательство издательского объединения «Вища школа».

• История познания и освоения электричества растянулась на тысячи лет и не завершена еще и сегодня. Известно, что уже за тысячу лет до нашей эры в юго-восточной Азии использовались естественные магниты для изготовления компаса, а в развалинах древнего Вавилона были обнаружены остатки устройства, которое, по видимому, являлось первой электрической батареей. Первая историческая запись, относящаяся к электричеству, ведет нас в VI в. до н. э., когда Фалес из Милета получил статическое электричество, натирая кусок янтаря сухой тканью. Говорят, что на самом деле первооткрывательницей была его юная дочь: пытаясь очистить свое янтарное веретено от мелких пылинок и ниточек, она заметила, что, счищенные, они снова спешат прильнуть к нему.

Однако прошло более чем две тысячи лет, прежде чем была построена первая электростатическая машина — генератор О. Герике (в 1640 г.). Несколько раньше были изобретены телескоп и микроскоп, предпринимались первые попытки исследования электричества. Англичанин У. Гильберт (1553—1603) занимался изучением электричества и магнетизма. Его исследования свойств магнитной стрелки привели к верному выводу, что Земля представляет собой магнит. Он открыл также свойство стали становиться магнитом под влиянием земного магнетизма, указал, чем отличается электрическая сила от магнетизма. Гильберту мы обязаны и словом «электричество», хотя он употреблял выражение «электрическая сила», а слово «электрический» производил от греческого названия янтаря — *ηλεκτρον* (электрон). Гильберт обнаружил довольно много веществ, помимо янтаря, способных электризоваться.

Как указывал Гильберт, древние и новые писатели неоднократно упоминали, что янтарь притягивает солому. Такое же свойство характерно и для агата. Однако не только эти два вещества притягивают мелкие тела. Подобной притягательной силой обладают стекло, сера и солома. Все эти вещества притягивают не только солому, но и все металлы, дерево, листья, камни, землю, даже воду и масло — словом все, что только может быть воспринято нашими чувствами.

Используя эти вещества, О. Герике изобрел аппарат, при помощи которого мог получать электричество легче и в большем количестве, чем Гильберт. Его машина представляла собой шар из серы, укрепленный на железной оси и приводимый во вращение несложным механизмом. Придерживая шар руками, его можно было заряжать и отводить заряд на исследуемое тело. Многочисленные опыты, проведенные О. Герике, во многом способствовали выяснению сущности электричества: он установил законы притяжения и отталкивания в самом примитивном виде и первый наблюдал истечение электричества и электрическую искру.

Кроме дальнейшей разработки опытов по электричеству (У. Гильберт и другие), внимание ученых в начале XVIII века было направлено главным образом на различные атмосферные явления. Однако работы ученых в области электричества ограничивались тем, что они описывали, какой длины были искры, замечено свечение или нет и т. д.

С. Грей (1670—1736) указал, что проводимость электричества зависит от материала проводников. Он установил, что различные тела, как, например, волосы, смола, стекло, сохраняют долгое время сообщенное им электричество. Поставленные им опыты позволили в дальнейшем П. Мушенбруку создать лейденскую банку, которая служила для накопления электричества и была по существу первым конденсатором.

В начале второй половины XVIII в. появился физик, который не только объяснил действие электростатической машины, но и научил людей спасаться от удара молнии своими знаменитыми исследованиями в области атмосферного электричества. Это был знаменитый американский ученый и государственный деятель Б. Франклин (1706—1790), который сделал существенный шаг вперед в теории электрических явлений. Пользуясь словами

«плюс», «минус», «батарея», «конденсатор», «проводник», «заряд», «разряд», «обмотка», мы вряд ли помним, что Франклин был первым, кто дал названия всем этим устройствам и явлениям.

Великий русский ученый М. В. Ломоносов (1711—1765) занимался исследованием атмосферного электричества. В 1753 г. он представил в Петербургскую Академию доклад под названием «Слово о явлениях воздушных от электрической силы происходящих», где не только указал на единство грозových и электрических явлений, но и теоретически объяснил явление электризации и грозových туч. Вместе с Г. В. Рихманом (1711—1753) им были проведены опыты по изучению молнии.

В 1785 г. французский физик Ш. Кулон (1736—1806) установил с помощью крутильных весов закон электростатических и магнитных взаимодействий — первый из важнейших законов электротехники.

В 1791 г. итальянец Л. Гальвани (1737—1798) обнаружил существование животного электричества.

Выдающийся итальянский физик и физиолог А. Вольта (1745—1827), готовый вначале подтвердить идею Л. Гальвани, при дальнейшем ходе исследований обнаружил совершенно новое явление — возникновение электрического тока под действием разнородных металлов. Подергивание лапки лягушки в опытах Л. Гальвани он также объяснял действием различных проводников. Следует отметить, что более поздние исследования подтвердили, что в мышцах животных действительно возникает электричество. Но в то время А. Вольта оказался победителем в споре двух ученых, а его теория стала общепризнанной. Практическим следствием его научных исследований явился вольтов столб — первый химический источник тока. Он состоял из высокого столба пластинок, которые лежали друг на друге таким образом, что две пластинки из разных металлов (одна медная, другая цинковая) разделялись суконной прокладкой, пропитанной раствором медного купороса. При соединении обоих концов столба проволокой по ней протекал электрический ток.

С помощью созданной русским акад. В. В. Петровым (1761—1834) мощной для того времени гальванической батареи им в 1802 г. открыто явление электрической дуги. В 1820 г. датский физик Х. Эрстед (1777—1851) открыл магнитное действие электрического тока.

Однако сам Х. Эрстед не дал исчерпывающего объяснения обнаруженному взаимодействию провода с током и магнитной стрелки. И никто не сумел так ясно и глубоко раскрыть смысл опытов Х. Эрстеда, как это сделал вскоре великий французский ученый А. Ампер (1775—1836). Он доказал, что электрический ток не только влияет на положение магнитной стрелки, но, что и сами токи взаимодействуют. Так, он установил закон (и вывел точные математические формулы) взаимодействия однонаправленных и противоположно направленных токов, а также создал первые электромагниты, состоящие из сердечника из мягкого железа, окруженного проволокой спиралью, по которой проходит ток.

Вместе со знанием законов электромагнетизма и устройства электромагнита для последующего развития учения об электричестве необходимо было установить общие закономерности, которым подчинен электрический ток. Изучили и исследовали эти закономерности два выдающихся немецких физика Г. Ом (1787—1854) и Г. Кирхгоф (1824—1887).

К 1843 г. английским физиком Д. Джоулем (1818—1889) и русским физиком Э. Х. Ленцем (1804—1865) был установлен закон теплового действия электрического тока, связавшего количественно электрические и тепловые явления.

Выдающийся вклад в развитие науки об электричестве и магнетизме внес великий английский физик М. Фарадей (1791—1867). Его опыты, составившие в науке целую эпоху, изложены в большом произведении «Экспериментальные исследования по электричеству», над которым он работал 24 года. М. Фарадей открыл электромагнитную индукцию, которая стала основой электротехники. Он обнаружил все основные случаи возбуждения индукционных токов и пространство, участвующее в передаче электрического действия, назвал полем, в своем мысленном воображении увидев силовые линии — потоки электрических и магнитных сил, пронизывающие пространство.

В первой же серии опытов М. Фарадей получил непрерывный постоянный ток при вращении металлического диска между концами сильного электромагнита. Еще раньше (1821 г.) М. Фарадей построил первый электрический двигатель, используя вращение проводника с током в постоянном магнитном поле. Таким образом была дока-

зана обратимость электромеханического преобразования. В 1882 г. Фарадей построил первую машину переменного тока. ♣

После изобретения телеграфа С. Морзе (1791—1872) Р. Оуэн писал, что возможность передавать мысли людей на расстоянии со скоростью 200 тысяч миль в секунду представляет собой самое чудесное открытие в летописи всех народов.

Создателем теории, в которой математически разрабатывались и обобщались принципы электродинамики, стал гениальный английский ученый Дж. Максвелл (1831—1879). Он показал, что все известное тогда о свете и электромагнитных явлениях может быть изложено с помощью системы дифференциальных уравнений в частных производных, куда электрические и магнитные поля входят как зависимые переменные.

Анализируя свои уравнения, Дж. Максвелл установил, что возбуждаемые электрические и магнитные поля распространяются в пространстве не мгновенно, а с некоторой конечной скоростью, зависящей от свойств среды, причем эта скорость в воздухе оказалась равной скорости света. К такому же выводу он пришел, разрабатывая свою гипотезу о токе смещения. Все это позволило ему уверенно заявить, что свет представляет собой электромагнитные волны.

~ Почти одновременно открыли явления вращающегося магнитного поля Г. Феррарис (1885 г.) и Н. Тесла (1888 г.). Русским инженером М. О. Доливо-Добровольским (1862—1919) был открыт трехфазный ток и построен простой и надежный двигатель с короткозамкнутым ротором. Вместе с открытием трансформатора это вызвало революционное преобразование в промышленности, так как обеспечило возможность применения электрического привода различных станков и передачу электроэнергии трехфазным током. ~

Двадцатый век ознаменовался новыми открытиями и изобретениями в области применения электричества. Прежде всего удалось увеличить мощность электротехнических устройств при неизменном их объеме за счет применения новых материалов и более совершенных конструкций. Например, мощность самого распространенного из электрических двигателей (асинхронного) в единице объема регулярно возрастала: в 5 раз с 1900 по 1940 г. и в 3 раза с 1940 г. Что касается генераторов, то здесь про-

гресс еще более разителен. В турбогенераторах, мощность которых достигает 1 млн. кВт, с введением прямого охлаждения водородом, а затем водой, удалось в 3 раза увеличить коэффициент использования материалов по сравнению с машинами естественного (воздушного) охлаждения.

Решающее влияние на развитие электротехники оказало бурное развитие электроники. Первые промышленные образцы транзисторов появились в 1949—1950 гг., а уже в 1955—1960 гг. широкое применение в электротехнике получили мощные кремниевые транзисторы и силовые диоды. В последние годы получили стремительное развитие интегральные схемы и микропроцессоры.

—Широкое применение достижений электроники явилось основой разработки и промышленного применения принципиально новых электротехнических устройств и обеспечило гибкость и удобство управления классическими машинами постоянного и переменного тока, в частности, на основе мощных полупроводниковых статических преобразователей. —

Электротехника — отрасль науки и техники, связанная с применением электрических и магнитных явлений, непрерывно и стремительно развивается. Так, в линейных ускорителях, синхротронах, бетатронах, широко применяемых для исследования явлений в ядерной физике, магнитные поля играют первостепенную роль. Чем большую энергию частиц надо получить — тем больше следует увеличить радиус их траектории, а, следовательно, и напряженность магнитного поля. До настоящего времени классические электромагниты создавали поле, не превышающее 2 Тл. Введение сверхпроводников позволило по крайней мере утроить его интенсивность.

Управляемая термоядерная реакция — сложнейшая научная и техническая проблема, с решением которой связана надежда человечества на практически неограниченное производство энергии. Основная трудность в решении этой проблемы заключается в том, что для зажигания самоподдерживающейся термоядерной реакции необходимо разогреть плазму до $(8...10) \cdot 10^7^\circ\text{C}$ и удерживать ее с помощью магнитного поля от соприкосновения со стенками камеры в течение нескольких секунд. В созданных советскими учеными установках «Токамак» уже получена температура плазмы $8 \cdot 10^7^\circ\text{C}$ и время удержания 0,1с.

Перспективным направлением развития электротехники является решение задачи прямого (без промежуточных стадий) преобразования различных видов энергии в электрическую. Одно из таких направлений — развитие магнитогидродинамического (МГД) преобразования теплоты в электричество. В МГД-генераторах раскаленный ионизированный газ пропускается через камеру с сильным магнитным полем, которое взаимодействует с движущимися отрицательно и положительно заряженными частицами ионизированного газа и разделяет их, отклоняя к электродам-коллекторам, расположенным в камере. Происходит прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.

В настоящее время в нашей стране разрабатывается проект крупного МГД-генератора, работающего на природном газе или угольной пыли.

Прямое преобразование энергии солнечных лучей в электрическую происходит в солнечных батареях. Их принцип действия основан на явлении образования разности потенциалов при освещении некоторых полупроводниковых материалов. Основной недостаток солнечных батарей в настоящее время — низкий к. п. д. (около 10%). Усовершенствования солнечных батарей и получение приемлемого к. п. д. следует ожидать к концу нынешнего столетия.

Представляется естественным вопрос, является ли электродинамика, разработанная Максвеллом, законченной наукой?

Взаимодействуя со многими областями науки, электродинамика бурно развивается, однако, несмотря на свою фундаментальность, она еще далека до завершения.

В последнее время на первый план выступает магнитогидродинамика. Эта область науки во многом еще не изучена и охватывает широчайший круг проблем от астрофизики до термоядерных реакторов.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, ЕГО СИЛОВЫЕ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Заряженные тела взаимодействуют между собой: одноименно заряженные отталкиваются одно от другого, разноименно заряженные — притягиваются. Это взаимодействие происходит на расстоянии и передается не мгновенно, а через конечный промежуток времени, т. е. существует конечная скорость передачи взаимодействия. Объяснение действия на расстоянии вызвало много гипотез, в результате которых возникла теория близкодействия, центральным понятием которой является понятие силового поля.

Заряженное тело является источником электрического поля. Взаимодействие заряженных тел объясняется тем, что каждое из них создает в окружающем пространстве поле, которое действует на другое заряженное тело с некоторой силой.

Электрическое поле является одной из форм материи, оно столь же реальный объект, как и обычное вещество. Поле обладает энергией. Согласно закону Эйнштейна энергия \mathcal{E} связана с массой m зависимостью $\mathcal{E} = mc^2$, где c — скорость света, поэтому поле должно иметь и массу.

Электрическое поле — одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующаяся воздействием на электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и не зависящей от ее скорости. Строго говоря, в природе отдельно не существуют электрическое и магнитное поля, они являются проявлением единого целого — электромагнитного поля. Отдельно рассматривать электрическое поле можно лишь в том случае, если магнитное поле достаточно мало и его влияние на изучаемые процессы не существенно. В аналогичной ситуации рассматривается и магнитное поле.

Взаимодействие заряженных тел зависит от их фор-

мы. Чтобы устранить влияние формы тела и установить общие закономерности сил, действующих на заряды в электрическом поле, рассматривают так называемые точечные заряды, т. е. такие заряженные тела, размеры которых намного меньше расстояния между ними. Сила F взаимодействия двух точечных зарядов q_1 и q_2 определяется законом Кулона

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Эта сила пропорциональна произведению величин зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними.

Электрическая сила взаимодействия двух зарядов зависит от расстояния так же, как и сила тяготения. Ее отличие от силы тяготения состоит, во-первых, в изменении знака силы в зависимости от знака заряда (сила может быть отталкивающей и притягивающей), а, во-вторых, в том, что эта сила неизмеримо больше силы тяготения (в 10^{37} раз!).

Важнейшей характеристикой электрического поля, определяющей его действие на неподвижный заряд, является напряженность. Если величина и линейные размеры заряда достаточно малы и практически не искажают исследуемое поле, то для различных по величине зарядов отношение силы, действующей на заряд, к его величине постоянно, т. е. $\frac{F}{q} = \text{const}$. Следовательно, это отношение не зависит от величины заряда, а определяется только полем в данной точке.

Отношение

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

является векторной характеристикой электрического поля и называется напряженностью поля или просто полем. Она равна силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля.

Графически электрическое поле изображают линиями напряженности, называемыми также электрическими силовыми линиями.

Электрическое поле уединенного заряда представляется в виде силовых линий, имеющих вид лучей, выходящих из центра, где расположен заряд (рис. 1. 1, а). Поле

в точке 2, созданное зарядом q_1 , расположенным в точке 1:

$$\mathcal{E}_2 = \frac{q_1}{\epsilon \cdot 4\pi r_{12}^2},$$

где \mathcal{E} — диэлектрическая проницаемость среды.

Электрическое поле двух одноименных и двух разноименных зарядов показано на рис. 1.1, б, в.

Поле может создаваться множеством источников и не обязательно определяется путем сложения полей отдельных зарядов, а может быть определено по распределению плотности поверхностного или объемного заряда. Если поле \mathcal{E}_2 каким-то образом измерено или рассчитано в месте расположения заряда q_2 , то сила, действующая на заряд q_2 ,

$$F = q_2 \vec{\mathcal{E}}_2.$$

Электрическое поле может иметь сложную форму, например в высоковольтном изоляторе. Поле в плоском конденсаторе равномерно, за исключением краев (рис. 1.1, г).

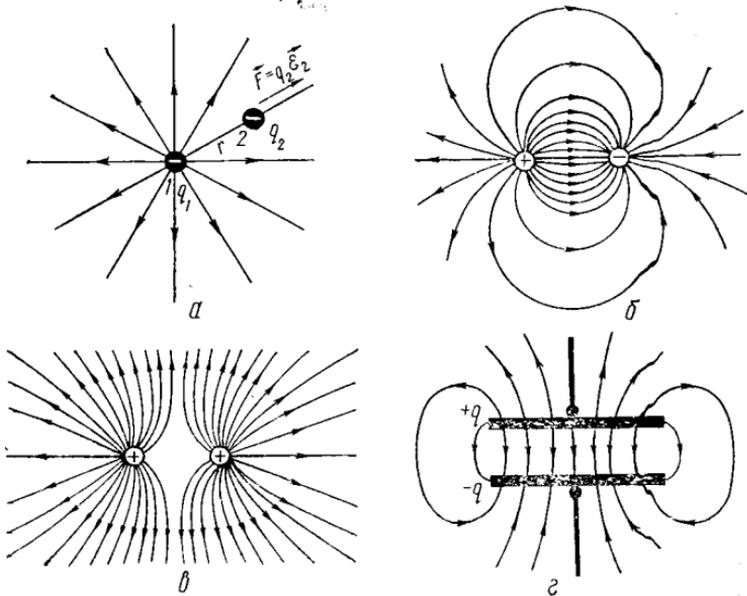


Рис. 1.1. Конфигурация электрических полей:

а — уединенного отрицательного заряда; б — двух разноименных зарядов; в — двух одноименных зарядов; г — плоского конденсатора.

Линии электростатического поля начинаются на положительном заряде и оканчиваются на отрицательном, т. е. они не замкнуты. Незамкнутые силовые линии означают наличие источников поля — зарядов.

Заряженное тело, например проводник, изолированный от земли, обладает потенциалом относительно земли. Потенциал φ в данной точке измеряется работой, которую необходимо затратить, чтобы перенести единицу заряда из бесконечности в данную точку. В бесконечности, под которой можно понимать землю, потенциал принимается равным нулю. В отличие от напряженности, являющейся векторной величиной, потенциал — величина скалярная. Он является энергетической характеристикой поля и определяет потенциальную энергию заряда q в данной точке поля:

$$\varphi = \frac{W}{q}.$$

Потенциальная энергия W определена с точностью до произвольной постоянной, это же относится и к потенциалу φ . Поэтому практический интерес представляют не сами потенциалы точек поля, а их разность или изменение потенциала при перемещении из одной точки поля в другую. Разность потенциалов между двумя точками равна напряжению U и может быть рассчитана, если известно распределение электрического поля между ними. Для плоского конденсатора, например, считая поле равномерным, получим

$$U = \mathcal{E}d,$$

т. е. разность потенциалов равна напряженности электрического поля, умноженной на расстояние d между обкладками. Зная распределение потенциалов в различных точках поля, можно определить его напряженность. Если при перемещении на величину Δr потенциал изменяется на $\Delta\varphi$, то проекция вектора напряженности электрического поля на направление перемещения Δr определяется по формуле

$$\mathcal{E}_r = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta r}.$$

Отсюда следует, что напряженность поля определяется изменением потенциала и направлена в сторону его уменьшения. Если разность потенциалов между любыми

точками некоторой поверхности равна нулю, то составляющая напряженности поля вдоль такой поверхности также равна нулю и, следовательно, вектор поля \vec{E} может быть только перпендикулярен к ней и направлен в сторону наиболее быстрого уменьшения потенциала.

Важной характеристикой электрического поля является также вектор электрического смещения D . Он связан с вектором \vec{E} соотношением

$$\vec{D} = \epsilon_{абс} \vec{E},$$

где $\epsilon_{абс}$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества, равная произведению диэлектрической проницаемости вещества ϵ (безразмерная величина) и электрической постоянной ϵ_0 (диэлектрической проницаемости вакуума), т. е.

$$\epsilon_{абс} = \epsilon \epsilon_0,$$

причем

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/М.}$$

Вектор напряженности электрического поля \vec{E} изменяется при переходе из одной среды с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 в другую среду с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 , а вектор \vec{D} остается неизменным.

У поверхности проводника при отсутствии пространственных свободных зарядов в прилегающих слоях диэлектрика величина вектора электрического смещения равна поверхностной плотности заряда σ

$$D = \epsilon_{абс} E = \sigma.$$

При равномерном распределении заряда

$$\sigma = \frac{q}{S}, \text{ или } q = \sigma S,$$

где S — площадь поверхности проводника.

Одной из важнейших физических характеристик проводников является их электрическая емкость. Если к уединенному проводнику (т. е. проводнику, вблизи которого нет других тел, влияющих на распределение зарядов на нем) подвести заряд Δq , то его потенциал возрас-

тет на величину $\Delta\varphi$, пропорциональную приращению заряда. Отношение

$$\frac{\Delta q}{\Delta\varphi} = C$$

называется электрической емкостью.

Емкость проводника характеризует его способность накапливать электрический заряд. Единицей емкости в единицах СИ является *фарад* (Ф). Это емкость такого проводника, увеличение заряда которого на 1 Кл приводит к повышению его потенциала на 1В. Фарад очень крупная единица (например, емкость земного шара составляет всего $5 \cdot 10^{-5}$ Ф), поэтому на практике применяются более мелкие единицы: микрофарад (10^{-6} Ф) и пикофарад (10^{-12} Ф). Значение емкости зависит от размеров тела и расстояния от поверхностей, где сосредоточены положительные и отрицательные заряды.

Свойство емкости используется в технике для накопления зарядов, т. е. создания накопителей энергии. Такие устройства называются конденсаторами. Конденсатор состоит из двух проводящих поверхностей, разделенных диэлектриком.

Емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_{абс} S}{d},$$

где S — площадь поверхности одной из обкладок, m^2 ; d — расстояние между обкладками, м; $\epsilon_{абс}$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества, разделяющего обкладки.

1.2. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Наиболее распространенным видом электрического тока является *ток проводимости*, представляющий собой направленное движение свободных носителей электрического заряда в веществе или вакууме. Ток создает магнитное поле. Например, ток, протекающий по прямолинейному уединенному проводнику достаточно большой длины, создает магнитное поле, силовые линии которого имеют вид концентрических окружностей. Вектор напряженности магнитного поля в данной точке совпадает с направлением касательной к окружности, опре-

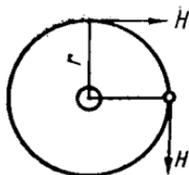


Рис. 1.2. Магнитное поле уединенного проводника с током.

деляемым по правилу буравчика. Величина напряженности определяется законом полного тока: падение магнитного потенциала вдоль некоторого замкнутого контура, охватывающего ток, равно полному току через этот контур. Полный ток представляет собой алгебраическую сумму всех токов, охваченных контуром.

Математически закон полного тока записывается так:

$$\sum H \Delta l = \sum I.$$

Для уединенного прямолинейного проводника с током I (рис. 1.2) поле на расстоянии r одинаково. Тогда на основании закона полного тока $Hl = I$, но так как $l = \pi r$, то

$$H = \frac{I}{2\pi r}.$$

Поле двух параллельных прямолинейных проводников с токами может быть получено путем геометрического сложения полей уединенных проводников с токами.

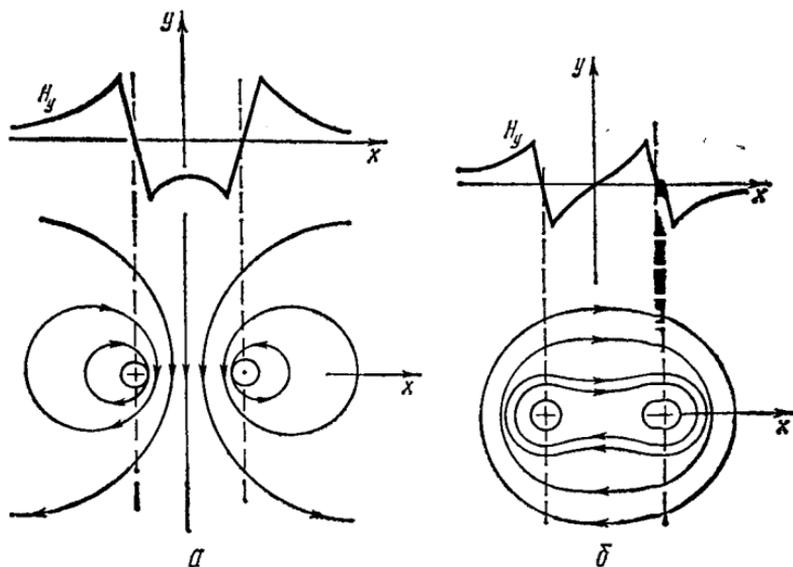


Рис. 1.3. Магнитное поле двух параллельных проводников с токами: а — одинакового направления; б — разного.

Результирующее поле двух проводников с токами одинакового направления представлено на рис. 1.3, а, для токов разного направления — на рис. 1.3, б. На этих же рисунках показано изменение составляющих поля H_y вдоль оси x .

При сложении ряда круговых токов образуется поле соленоида (рис. 1.4). Она похожа на поле прямолинейного магнита. Для соленоида достаточно большой длины l по сравнению с его диаметром поле в центре (без учета влияния концов)

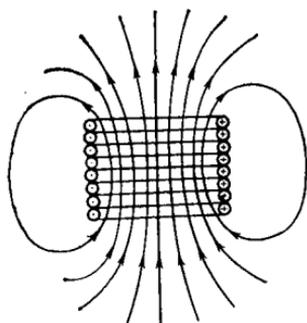


Рис. 1.4. Магнитное поле соленоида.

$$H = \frac{I\omega}{l},$$

где ω — число витков соленоида.

Для любого тока в однородной среде поле может быть рассчитано по закону Био—Савара—Лапласа. Согласно этому закону каждый элемент тока $I\Delta l$ создает на расстоянии r от элемента поле

$$\Delta H = \frac{I\Delta l \sin\alpha}{r^2},$$

где α — угол между направлением тока и вектора \vec{r} .

Результирующее поле находится суммированием полей отдельных элементов тока.

Вектор электромагнитной индукции \vec{B} связан с вектором \vec{H} уравнением

$$\vec{B} = \mu_{\text{абс}} \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

где μ_0 — магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума); μ — относительная магнитная проницаемость среды

$$\mu = \frac{\mu_{\text{абс}}}{\mu_0},$$

причем

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Сила взаимодействия между однородным полем ин-

дукции B и прямолинейным проводником с током определяется по закону Ампера

$$F = BIl \sin \alpha,$$

где l — длина проводника; B — индукция, постоянная по всей длине l ; α — угол между вектором \vec{B} и направлением тока I .

Направление силы определяется правилом «левой руки». Однако проще воспользоваться правилом Миткевича, объяснение которого дано в следующем параграфе. Максимальная сила получается, когда $\alpha = \pi/2$, т. е. когда индукция направлена перпендикулярно току.

Нормальная составляющая вектора \vec{B} при переходе из одной среды в другую изменяется непрерывно, т. е. $B_{n1} = \mu_1 H_{n1} = B_{n2} = \mu_2 H_{n2}$, а нормальная составляющая вектора \vec{H} изменяется скачком $H_{n1} = \frac{\mu_2}{\mu_1} H_{n2}$ пропорционально отношению магнитных проницаемостей сред μ_2/μ_1 .

Важной особенностью линий магнитного поля является замкнутость магнитных силовых линий. Это указывает на то, что в природе не существует «магнитных» зарядов, являющихся источниками поля. Такое поле называется вихревым, в отличие от потенциального поля (электростатического), имеющего источник (заряды).

Сравним силы взаимодействия зарядов в электрическом поле и токов в магнитном поле. Силы взаимодействия между зарядами или между полем и помещенным в нем зарядом теоретически могут достигать весьма большой величины. Однако применить эти силы в технике весьма затруднительно по причине возникновения пробоя в диэлектрике. Если пользоваться технически допустимыми значениями напряженности, например для воздуха 20 кВ/см ($2 \cdot 10^6 \text{ В/м}$), то для конденсатора с изолирующей средой $\epsilon_{\text{абс}} = \epsilon_0$ плотность заряда на обкладке

$$\sigma = \epsilon_0 \mathcal{E},$$

заряд при площади пластин $S = 1 \text{ м}^2$

$$q = \sigma S = \sigma$$

и сила притяжения между пластинами

$$F = \mathcal{E}q = \epsilon_0 \mathcal{E}^2 = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 10^{12} \approx 35,4 \text{ Н}.$$

Рассчитаем теперь силу взаимодействия двух параллельных проводников с токами. Пусть ток в проводе равен 10^5 А, расстояние между проводами 1 м. Тогда по закону Ампера при $\alpha = \pi/2$.

$$F = BI l.$$

Индукция, создаваемая током одного провода в центре другого

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{I}{2\pi r},$$

следовательно, при $l = 1$ м сила

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^{10} \cdot 1}{2\pi \cdot 1} = 2 \cdot 10^3 II.$$

Из этого примера становится ясным целесообразность применения магнитного поля как источника электромагнитной силы.

1.3. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

До сих пор мы рассматривали электростатические и магнитостатические поля. Открытия Фарадея, Максвелла, Герца положили начало учению об электромагнитном поле. Закон электромагнитной индукции для проводника длиной l в формулировке Фарадея записывается в виде

$$e_{\text{пр}} = Blv,$$

где $e_{\text{пр}}$ — электродвижущая сила (э. д. с) в проводнике; v — скорость движения проводника относительно поля; l — длина проводника. Если, как показано на рис. 1.5, между полюсами магнита движется проводник и пересекает перпендикулярно направленное поле вектора \vec{B} , то

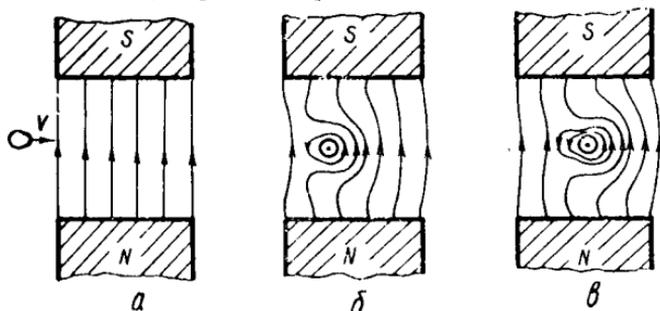


Рис. 1.5. Взаимодействие проводника с током и магнитного поля.

в проводнике возникает э. д. с. и по замкнутому проводнику пойдет ток в направлении э. д. с. Направление э. д. с. определяется правилом «правой руки». Кроме этого правила, полезно знать правило Миткевича, которое формулируется так: направление индуцированной э. д. с. и тока определяется деформацией поля по правилу буравчика (правого винта). Электромагнитная сила направлена в сторону ослабленного поля. Линии магнитного поля мнемонически ведут себя подобно упругим нитям и стремятся к сокращению и боковому распыру. Отсюда видно и направление действия электромагнитной силы.

Явление электромагнитной индукции лежит в основе преобразования механической энергии в электрическую и наоборот. Действительно, электромагнитная мощность равна произведению электромагнитной силы на скорость перемещения проводника, т. е.

$$P_{\text{эм}} = Fv.$$

Так как по закону Ампера $F = BIl$, а $Blv = e$, то

$$P_{\text{эм}} = BIlv = eI,$$

Таким образом, электромагнитная мощность равна произведению э. д. с. на величину тока. Из этого уравнения следует возможность преобразования электрической мощности в механическую и обратно. Если замкнутый проводник, расположенный перпендикулярно магнитному полю, привести в движение со скоростью v за счет внешней механической силы, то при этом возникнет электрический ток, создающий тормозящую электромагнитную силу, — происходит преобразование механической энергии в электрическую (генераторный). Если же проводник питать от внешнего источника тока, то возникнет ускоряющая электромагнитная сила, уравновешивающая внешнюю тормозящую силу, т. е. происходит обратный процесс преобразования электрической энергии в механическую (двигательный).

По Фарадею э. д. с. возникает вследствие пересечения проводником силовых линий магнитного поля. Максвелл рассматривал э. д. с. в замкнутом контуре и показал, что э. д. с. равна скорости изменения магнитного потока Φ , сцепленного с контуром,

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Магнитный поток Φ равен площади, ограниченной контуром, умноженной на среднее значение нормальной составляющей индукции,

$$\Phi = B_n S.$$

Положительной принята э. д. с., возникающая при убывании потока, т. е. когда приращение $\frac{d\Phi}{dt}$ отрицательно. Отрицательный знак в приведенной формуле принят согласно закону инерции магнитного потока. При исчезновении тока возникает э. д. с., стремящаяся поддержать исчезающий ток, и, наоборот, при возникновении тока возникает э. д. с., препятствующая возрастанию тока.

Можно доказать, что обе эти формулировки закона электромагнитной индукции эквивалентны, если рассматриваются замкнутые цепи. Из формулировки Фарадея следует, что при движении в магнитном поле проводника длиной в 1 м возникает напряженность электрического поля, равная векторному произведению:

$$\vec{E} = \vec{B} \times \vec{v}.$$

Из формулировки Максвелла следует, что для возникновения э. д. с. не обязательно нужен замкнутый контур проводника. Можно рассматривать любой воображаемый контур в пространстве. При изменении потока в этом контуре будет возникать индуцированное электрическое поле.

1.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При передаче электрической энергии от генераторов к потребителям образуются замкнутые электрические цепи тока. В цепь входят генератор, линия передачи, потребители.

Генератор постоянного тока создает э. д. с., под действием которой в замкнутой цепи протекает ток. По закону Ома ток прямо пропорционален э. д. с. E и обратно пропорционален полному сопротивлению цепи R

$$I = E/R.$$

Основным сопротивлением цепи является полезное сопротивление потребителя (например, лампа накаливания,

электрическая печь). Внутреннее сопротивление генератора и сопротивление линии передачи должны быть по возможности минимальными для уменьшения потерь энергии, поскольку электрический ток, проходя по проводам, нагревает их. При этом электрическая энергия превращается в тепловую, которая рассеивается в окружающем пространстве, не выполняя полезной работы, т. е. представляет потерю энергии. Мощность потерь электрической энергии пропорциональна квадрату тока и сопротивлению цепи

$$P_{\text{пот}} = I^2 R.$$

Сопротивление проводника постоянного тока зависит от материала, пропорционально его длине l и обратно пропорционально поперечному сечению S , т. е.

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ — удельное сопротивление материала проводника.

Для уменьшения потерь энергии желательны использовать материалы с малым удельным сопротивлением. Минимальное удельное сопротивление имеют серебро и медь, однако серебро — дорогостоящий металл, поэтому в настоящее время самыми распространенными проводниками являются медь и алюминий.

Перспективным для снижения потерь энергии является использование явления сверхпроводимости, открытого Х. Камерлинг-Оннесом в 1911 г. Оно заключается в том, что вблизи температуры абсолютного нуля ($-273,16^\circ\text{C}$) удельное электрическое сопротивление некоторых металлов падает до нуля. Уменьшение сопротивления происходит почти скачкообразно в пределах разности температур $0,01^\circ\text{C}$. Многие металлы, их сплавы и соединения переходят в состояние сверхпроводимости и при температурах несколько выше абсолютного нуля. Сверхпроводники теряют свойство сверхпроводимости, когда индукция магнитного поля на их поверхности превысит определенное для данного металла и данной температуры критическое значение. До сих пор самые высокие температуры и критические поля наблюдались в соединениях Nb_3Sn , V_3Si , V_3Ga , однако они слишком хрупкие и дорогие. Поэтому в настоящее время широкое применение получил сплав ниобия с цирконием, легко поддающийся пластической обработке.

В неразветвленной электрической цепи алгебраическая сумма э. д. с. равна сумме падений напряжения на всех элементах цепи. Аналогичный закон справедлив и для магнитных цепей: в замкнутом контуре магнитной цепи сумма намагничивающих сил равна сумме произведений напряженности магнитного поля на длину участка магнитной цепи, т. е.

$$\sum_{j=1}^m F_j = \sum_{i=1}^n H_i l_i,$$

где $\sum F_j = \sum j \omega_j$ — сумма произведений токов на число витков.

Выразив H_i через величину индукции — $H_i = B_i / \mu_i$ и учитывая, что в неразветвленной магнитной цепи поток $\Phi_i = B_i S_i = \text{const}$ (здесь S_i — площадь поперечного сечения магнитопровода), получим соотношение для магнитной цепи, аналогичное закону Ома для электрической цепи

$$\sum F_j = \Phi \sum \frac{l_i}{\mu_i S_i},$$

или

$$F = \Phi R_m; \quad \Phi = \frac{F}{R_m},$$

где $F = \sum F_j$ — сумма намагничивающих сил; $R_m = \sum \frac{l_i}{\mu_i S_i}$ — сумма магнитных сопротивлений последовательно включенных участков магнитной цепи.

По форме выражение для тока в электрической цепи подобно выражению для потока в магнитной цепи. Существенное различие состоит в том, что электрическое сопротивление обычно мало зависит от тока и может считаться постоянным, а магнитное сопротивление зависит от магнитной проницаемости данного элемента цепи. В свою

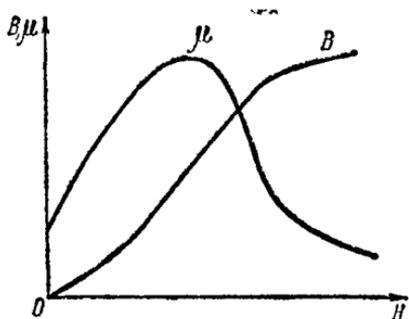


Рис. 1.6. Зависимость магнитной проницаемости μ и индукции B от напряженности магнитного поля H для ферромагнитных материалов.

очередь магнитная проницаемость зависит от напряженности, а следовательно, от магнитного потока (рис. 1.6). Поэтому при расчете магнитной цепи задаются потоком Φ , по его величине определяют индукцию в отдельных элементах цепи путем деления Φ на площадь сечения S . Затем по кривым намагничивания $B = \mu H$ находят напряженность поля H_i , умножают ее на длину участка l_i и, суммируя $H_i l_i$ по всей цепи находят намагничивающую силу для заданного значения потока.

1.5. ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменный ток вырабатывается генератором переменного тока — электрической машиной, обычно состоящей из трехфазного статора и ротора. Ротор может возбуждаться постоянным током — в этом случае машина будет синхронной, т. е. вращение ротора и магнитного поля синхронное, или переменным током — в этом случае машина асинхронная, т. е. частота вращения ротора выше частоты вращения магнитного поля. В любом случае в обмотках статора по закону электромагнитной индукции индуцируется трехфазный переменный ток заданной частоты.

Наиболее целесообразной формой тока является синусоидальная, что достигается специальным устройством обмоток на статоре. Мгновенное значение тока

$$i = I_m \sin \omega t,$$

где I_m — амплитуда тока; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота.

Стандартной промышленной частотой в СССР и Европе принята частота 50 Гц, в США и Канаде — 60 Гц.

При протекании тока по контуру, состоящему из нескольких витков, создается магнитный поток, связанный со всеми витками. Этот поток называется потоко сцеплением и определяется по формуле

$$\psi = \Phi w,$$

где Φ — поток, создаваемый одним витком. Потокосцепление пропорционально току и коэффициенту самоиндукции (индуктивности)

$$\psi = Li.$$

Индуктивность определяется как частное от деления потокосцепления на ток

$$L = \frac{\psi}{i}$$

и характеризует способность контура запастись магнитную энергию. Индуктивность в линейных цепях величина постоянная. В контурах с ферромагнитным сердечником при изменении тока в контуре магнитная проницаемость, а следовательно, и магнитное сопротивление меняются, поэтому зависимость потока от тока является нелинейной.

При переменном токе в контуре возникает э. д. с. самоиндукции, уравновешивающая напряжение, приложенное к контуру, активным сопротивлением которого можно пренебречь:

$$e_s = - \frac{d\psi}{dt} = - L \frac{di}{dt} = u.$$

При постоянном токе э. д. с. самоиндукции отсутствует и приложенное постоянное напряжение уравновешивается омическим падением напряжения на активном сопротивлении: $u = iR$.

В более общем случае при переменном токе приложенное к цепи внешнее напряжение уравновешивается активным падением напряжения и э. д. с. самоиндукции, т. е.

$$u = iR + L \frac{di}{dt} = iR - e_s.$$

Если $u = U_m \sin \omega t$, то должен возникнуть установившийся ток

$$i = I_m \sin (\omega t - \varphi),$$

амплитуда которого равна напряжению, деленному на полное сопротивление цепи

$$I_m = \frac{U_m}{z} = \sqrt{\frac{U_m^2}{R^2 + (\omega L)^2}},$$

а фаза отставания тока от напряжения определяется отношением индуктивного и активного сопротивления:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}.$$

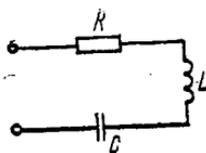


Рис. 1.7 Цепь с последовательно соединенными активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью.

В общем случае электрическая цепь состоит из активного сопротивления R , катушки индуктивности L и конденсатора емкостью C (рис. 1.7). Конденсатор производит переменный ток i за счет изменения электрического поля во времени (ток смещения). Если известен ток, можно найти заряд конденсатора

$$q = \int idt,$$

а зная емкость C , нетрудно определить напряжение на конденсаторе

$$u_c = q/C.$$

Тогда уравнение равновесия напряжений в цепи будет иметь вид

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = iR - e_s + u_c.$$

При синусоидальном приложенном напряжении в цепи устанавливается ток $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ амплитудой

$$I_m = \frac{U_m}{z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

где z — полное сопротивление цепи; $\frac{1}{\omega C} = x_c$ — емкостное сопротивление; ωL — индуктивное сопротивление.

Результирующее реактивное сопротивление равно разности индуктивного и емкостного сопротивлений

$$x = x_L - x_c,$$

поэтому при определенных величинах частоты и емкости C результирующее реактивное сопротивление может обратиться в нуль. Происходит явление резонанса напряжений, т. е. полная компенсация индуктивного сопротивления емкостным. В результате ток значительно возрастает, так как его величина будет определяться только активным сопротивлением R .

Наличие реактивных сопротивлений в цепи влияет не только на величину тока, но и приводит к сдвигу тока во времени (по фазе) по отношению к приложенно-

му напряжению. Величина угла сдвига φ определяется по выражению

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x_L - x_C}{R} = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}.$$

В зависимости от характера полного сопротивления угол φ может изменяться от $\pi/2$ ($z = x_L$) до $-\pi/2$ ($z = x_C$). Большинство приемников электрической энергии имеет активно-индуктивное сопротивление, поэтому для них угол φ лежит в пределах от 0 до $\pi/2$.

При этом полный ток $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ может рассматриваться как сумма активного тока $i_a = I_{ma} \sin \omega t$, совпадающего по фазе с приложенным напряжением, и реактивного тока $i_p = I_{mp} \sin(\omega t - \pi/2)$, сдвинутого по фазе относительно напряжения на четверть периода.

Амплитуда активного тока $I_{ma} = I_m \cos \varphi$, реактивного тока $I_{mp} = I_m \sin \varphi$.

Активная составляющая тока определяет мощность, передаваемую по цепи $P = \frac{1}{T} U_m I_m \cos \varphi = U_{\text{эф}} I_{\text{эф}} \cos \varphi = U_{\text{эф}} I_{a\text{-эф}}$,

где $U_{\text{эф}} = U_m/\sqrt{2}$ и $I_{\text{эф}} = I_m/\sqrt{2}$ — эффективные (действующие) значения напряжения и тока.

Величину $\cos \varphi$ называют коэффициентом мощности. В силовых цепях $\cos \varphi$ стремятся приблизить к единице для уменьшения потерь в сетях, генераторах и их элементах.

Глава 2

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ

2.1. ОБЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ.

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В СССР

Энергетика, или топливно-энергетический комплекс страны, охватывает получение, передачу, преобразование и использование различных видов энергии и энергетических ресурсов. Она является основой технико-экономического прогресса во всех отраслях народного хозяйства. Ведущую составляющую часть энергетики представляет электроэнергетика. Электроэнергетика в широком смысле включает производство, передачу, преобразо-

вание и использование электроэнергии и подразделяется на следующие области:

1. Топливо, его добыча, переработка и транспорт.
2. Гидростроительство.
3. Электростанции (тепловые — ТЭС, атомные — АЭС, гидравлические — ГЭС), теплосиловое гидротехническое и электрическое оборудование.
4. Энергетическое машиностроение (паровые, газовые и гидравлические турбины, турбо- и гидрогенераторы.).
5. Линии электропередачи, трансформаторы, электрические сети и электрические системы, электрические аппараты высокого напряжения.
6. Потребители электроэнергии (промышленность, транспорт, сельское хозяйство, быт и др.).

Электроэнергетика является базой электрификации, т. е. широкого внедрения в народное хозяйство электрической энергии, вырабатываемой централизованно на электростанциях, объединенных линиями электропередачи в энергосистемы. Электрификация позволяет правильно использовать природные энергетические ресурсы, более эффективно размещать производительные силы, механизировать и автоматизировать производство, увеличить производительность труда.

Развитию электрификации нашей страны уделялось большое внимание с первых лет образования Советского государства. Всем памяты слова В. И. Ленина: *«Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны»*¹.

Царская Россия среди промышленно развитых капиталистических стран занимала 13-е место по производству электроэнергии. Однако уже в то время в России сформировалась отечественная школа электротехников, были построены электростанции, началось использование электроэнергии для освещения и привода рабочих машин, имелись квалифицированные кадры инженеров и рабочих. Все это явилось технической основой для успешного решения задачи электрификации Советской страны.

По инициативе В. И. Ленина была создана Государственная комиссия по электрификации России во главе с Г. М. Кржижановским, которая подготовила к VIII Всероссийскому съезду Советов Государственный план

¹ Ленин В. И. Полн. собр. соч., т. 42, с. 159.

электрификации России (ГОЭЛРО), по которому предусматривалось за 10—15 лет построить 30 тепловых и гидравлических электростанций общей мощностью 1750 тыс. кВт.

2.2. МИРОВЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ И ПРОБЛЕМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИЗИСА

За последние годы мировое производство электрической энергии приблизительно удваивается каждые десять лет. Поскольку национальный доход и уровень жизни населения находятся в прямой зависимости от обеспеченности энергией, развитие энергетики и обеспеченность энергоресурсами имеют первостепенное значение для жизни общества.

В настоящее время свыше 90% мирового производства энергии основано на использовании минеральных источников (уголь, нефть, природный газ). В 1835 г. мировая добыча угля составляла 40 млн. т., в 1900 г. — 900 млн. т, а к 1979 г. она возросла уже до 2430 млн. т. Резко увеличилось производство и потребление нефти и газа. (В 1900 г. нефти добывалось всего 20 млн. т, в 1970 г. — 2450 млн. т).

Огромный скачок в росте производства и потребления энергии на основе невосстанавливаемых минеральных ресурсов заставляет оценить их объемы и задуматься о перспективах, имея в виду, что запасы минерального топлива далеко не безграничны.

Оценка мировых запасов твердого топлива дана на X Мировой энергетической конференции в 1974 г. Она представлена данными табл. 2. 1. Промышленные запасы природного газа по данным конференции составляют

Т а б л и ц а 2.1

Страны (регионы)	Общие запасы твердого топлива, млрд. т	Достоверно извлекаемые запасы, млрд. т
С ССР	5 713	136
С ША	2 926	186
К НР	1 011	38
К а н а д а	109	
Е в р о п а (без С ССР)	608	127
Д р у г и е с т р а н ы	388	58

(в млрд. т): для Среднего и Ближнего Востока — 9884; остальных стран Азии (без СССР) — 2272; Европы (включая СССР) — 21757; Африки — 5709; Северной Америки — 10649; Южной Америки — 1589.

Запасы угля и газа, приходящиеся на долю социалистических стран, составляют соответственно 56 и 32% мировых запасов.

В настоящее время годовой прирост расхода энергии достиг 4,8% и более чем вдвое превышает среднегодовой прирост населения (2%).

По существующим прогнозам ООН мировой расход энергии с 1970 по 1985 г. должен возрасти в 2,3 раза, а к 2000 г. еще в 2,3 раза. По другим оценкам после 1985 г. ожидается некоторое уменьшение темпов роста потребления энергии (увеличение в 1,5 раза за 15 лет). Бурный рост потребления энергии и ограниченность существующих запасов минерального топлива может привести в будущем к острому недостатку энергоресурсов. Это относится в первую очередь к запасам нефти, которые по некоторым данным могут быть исчерпаны в ближайшие несколько десятилетий.

Поэтому перед человечеством стоит насущная проблема — поиск новых источников энергии. При этом следует иметь в виду не только ограниченность запасов минеральных источников как «топлива» для энергетики, но и их огромное значение в качестве сырья для химической промышленности.

В ближайшем будущем, кроме минеральных источников энергии, будет все шире использоваться атомная энергия.

Существующие и строящиеся в настоящее время атомные электростанции основаны на применении мощных реакторов на тепловых нейтронах, которые используют не более 1% потенциальной энергии ядерного топлива. По имеющимся данным мировые запасы урана, пригодного для существующих АЭС при прогнозируемом их развитии, могут быть исчерпаны к концу настоящего столетия. Поэтому ученые все больше внимания уделяют разработке реакторов-размножителей на быстрых нейтронах. При их совместной работе с реакторами на тепловых нейтронах оказывается возможным в 20...30 раз увеличить удельный выход энергии.

Однако кардинальное решение энергетической проблемы следует ожидать после создания источников энер-

гии, основанных на использовании энергии управляемого термоядерного синтеза, примерно в начале XXI в. Все большее значение приобретает использование других, так называемых, восстанавливаемых источников энергии: солнца, глубинной теплоты земли, ветра, морских волн.

Солнце — практически неиссякаемый источник энергии. От Солнца на Землю направляется тепловой поток $1,57 \cdot 10^{18}$ кВт·ч в год. Непосредственно до суши Земли доходит приблизительно одна пятая часть этой энергии, т. е. около $3 \cdot 10^{17}$ кВт·ч. Если взять только десятую часть суши Земли и использовать энергию солнца с к. п. д. 10%, то можно получить $3 \cdot 10^{15}$ кВт·ч энергии, что приблизительно в 25 раз больше энергии, потребляемой человечеством за год в настоящее время.

Все это объясняет повышенный интерес к использованию солнечной энергии и стимулирует научные исследования в этом направлении.

Ветроэнергетика пока не играет заметной роли, но потенциальные запасы энергии ветра в СССР огромны. В 65 районах страны скорость ветра превышает 6 м/с. Расчеты показывают, что потенциальные возможности ветра равны 11 млрд. кВт, что в 55 раз больше мощности всех электростанций страны. В настоящее время в нашей стране ведутся интенсивные работы по созданию ветроэнергетических установок. Разработаны и изготовлены серийно более 10 типов ветродвигателей (ветромеханический агрегат «Чайка», ветроэлектрические установки УВЭУ, «Беркут», «Ветерок» и др.).

Проводятся также исследования по использованию энергии и морских приливов и волн, а также использованию глубинной теплоты Земли.

Особенно перспективным представляется использование энергии фотосинтеза. В процессе фотосинтеза на свету растения усваивают углекислый газ, восстанавливают его углерод, образуя органические вещества с выделением кислорода. Наземные и водные растения Земли ежегодно усваивают в процессе фотосинтеза 175 млрд. т углерода, что соответствует энергии $2 \cdot 10^{15}$ кВт·ч и в 500 раз превосходит количество энергии, вырабатываемой на всех электростанциях мира.

В разработке и осуществлении плана ГОЭЛРО приняли участие около 200 выдающихся отечественных инженеров и ученых.

В 1935 г. план ГОЭЛРО по основным показателям был перевыполнен почти вдвое.

В 1940 г. суммарная мощность электростанций Советского Союза превысила 11 млн. кВт. Прирост производства электроэнергии в нашей стране за предвоенные 1937—1940 гг. составил в среднем 4 млрд. кВт·ч в год. За этот же период среднегодовой прирост электроэнергии в Англии был равен 2 млрд. кВт·ч, в Японии — 1,67 млрд. кВт·ч. В 1940 г. электростанции СССР выработали 48 млрд. кВт·ч и Советский Союз вышел по этому показателю на 3-е место в мире, опередив такие промышленные развитые страны, как Англия, Франция, Италия и Швеция. Во время Великой Отечественной войны были разрушены крупнейшие тепловые электростанции — Сталиногорская, Каширская, Зуевская, Дубровская, Шахтинская и десятки других. Были взорваны Днепровская гидроэлектростанция им. В. И. Ленина, Свирьская и др. После войны электрификация СССР развивалась бурными темпами, ежегодный прирост мощности электростанций составлял от 7 до 11%, т. е. удваивался за каждые 10 лет.

Развитие электроэнергетики в СССР и в настоящее время является предметом особой заботы нашей партии и правительства. По плану одиннадцатой пятилетки производство электроэнергии в 1985 г. должно достигнуть 1550 ... 1600 млрд. кВт·ч.

2.3. ХАРАКТЕРИСТИКА ВИДОВ ТОПЛИВА

Основными видами топлива являются: каменный уголь, газ, нефть, торф, ядерное топливо. Качество топлива определяется его теплотворной способностью, т. е. количеством теплоты, выделяемой при сгорании 1 кг топлива (уголь 29, 33 ... 33, 52 МДж/кг, нефть и газ 41, 90 ... 46, 09 МДж/кг). В качестве топливного эквивалента энергии принято условное топливо с теплотворной способностью 29,33 МДж/кг или 8 кВт·ч/кг. Ядерное топливо имеет теплопроводную способность в 3 млн. раз больше, т. е. около 20 млн. кВт·ч/кг.

Не вся тепловая энергия, выделяющаяся при сгорании топлива, превращается в электрическую. Согласно опубликованным данным в 1976 г. удельный расход топлива на 1 кВт·ч электроэнергии составил 0,337 кг, т. е. из 1 кг топлива получалось 3 кВт·ч электроэнергии, в то время как полное количество энергии в 1 кг угля состав-

Таблица 2.2

Годовое производство электроэнергии, млрд. кВт·ч

Годы	СССР	США	Англия	Япония	ФРГ
1950	91	390	66	45	46
1975	1038	2100	282	460	286
1980	1295	3550	465	960	500
1985 (п лан)	1550... 1600	—	—	—	—

ляет 8 кВт·ч. Следовательно, полный коэффициент полезного действия составил $3/8$, или 37,5%; 62,5% энергии ок азывается потеряннм. Большие потери возникают вследствие низкого к. п. д. тепловой машины (40...41%), а также вследствие потерь тепла в паровом котле и других частях теплосиловоу установки.

Годовое производство электроэнергии и потребность в топливе неуклонно растут. По данным табл. 2.2 можно рассчитать потребность в топливе. Если принять, что в нашей стране в 1985 г. будет выработано 1600 млрд. кВт·ч электроэнергии, то для этого потребуется $(1600 \cdot 10^9) : 3 = 533 \cdot 10^9$ кг, или 533 млн. т условного топлива. Следует учесть также, что далеко не все топливо расходуется на производство электроэнергии, значительная его часть идет на отопление, технологические нужды предприятий и т. д. Поэтому добыча топлива должна значительно превышать его потребность для производства электроэнергии (приблизительно в три раза).

2.4. ЗАПАСЫ ТОПЛИВА И ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС СССР

Наша страна обладает большими запасами топлива в Сибири и Средней Азии. Например, Канско-Ачинское месторождение в Западной Сибири содержит запасы угля примерно 70 млрд. тонн условного топлива (т. у. т.). Расчеты показывают, что добыча угля на Канско-Ачинских разрезах может быть доведена в 1990 г. до такого уровня, что стоимость этих углей на месте добычи будет составлять 3—4 руб. за 1 т.у.т. по сравнению с 14...18 руб. за 1 т. у. т. при шахтной добыче углей в Донбассе. Экибастузское месторождение (в Казахстане) оценивается в

10 млрд. т.у.т. Здесь предполагается к 1990 г. значительно увеличить суммарную мощность тепловых станций.

Быстро возрастает добыча других видов топлива — нефти, газа. Сложной и многоплановой проблемой для нашей страны является транспортировка энергоресурсов с востока в центральные районы страны, поскольку они на 80% сосредоточены в Сибири и Средней Азии, а потребление их примерно на 75% происходит в европейской части страны. Проблема транспортировки в перспективе до 1990 г. будет решаться тремя путями: железнодорожными перевозками, трубопроводами (нефть, газ) и линиями электропередач. Большой интерес представляют научные поиски новых видов трубопроводного транспорта твердого топлива с применением гидроконтейнеров.

Это направление имеет особое значение для транспортировки канско-ачинских углей в центр страны.

Для передачи электроэнергии в Центр страны необходимо сооружение линий электропередачи большой протяженности и высокого напряжения: до 1150 кВ на переменном токе и 1500 кВ на постоянном токе. Мощность электростанций по прогнозам к 1990 г. также значительно возрастет. Соответственно укрупнятся и энергетические системы и увеличится дальность передачи электроэнергии.

Передача электрической энергии существующим способом становится неэкономичной. Одним из перспективных направлений улучшения экономичности является использование явления сверхпроводимости для линий электропередач большой мощности (криогенная ЛЭП).

Особое внимание уделяется в нашей стране развитию атомной энергетики, строительству АЭС. Несмотря на высокую теплотворную способность обогащенного атомного топлива ($10 \cdot 10^6$ кВт·ч/кг), при использовании реакторов на тепловых нейтронах стоимость атомного топлива на единицу вырабатываемой электроэнергии получается такого же порядка, как и обычного органического топлива. В реакторах на быстрых нейтронах образуется элемент плутоний-239, используемый в последующем для производства электроэнергии. Появляется возможность возобновления атомного топлива («чудо-печка»).

Заметную долю в энергобалансе страны (около 20%) имеют ГЭС, вырабатывающие самую дешевую электроэнергию. Объем производства электроэнергии на ГЭС составляет 20% общего объема производства энергии.

Громадное значение имеет проблема повышения экономичности использования топлива. В одиннадцатой пятилетке ставится задача обеспечить экономию топливно-энергетических ресурсов в размере 160...170 млн. т.у.т. Основными путями экономии являются снижение расхода топлива на тепловых электростанциях, дальнейшее развитие централизованного теплоснабжения потребителей путем строительства теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), экономичность которых значительно выше, чем конденсационных станций (КЭС), и крупных районных котельных. Существенным является также широкое внедрение энергосберегающих технологий в промышленности. Обнадеживающие перспективы открывает использование магнетогидродинамического способа производства электроэнергии, при котором повышается к. п. д. преобразования до 55%. Весьма важно также увеличить объем использования в народном хозяйстве возобновляемых источников энергии (гидравлической, солнечной, ветровой, геотермальной).

2.5. ВИДЫ И ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Тепловые электростанции. ТЭС вырабатывают 80% всей электроэнергии нашей страны. Обычно это очень мощные электростанции (до 6 млн. кВт), сооружаемые чаще всего вблизи залежей топлива и основных потребителей электроэнергии. Основные элементы ТЭС показаны на рис. 2.1, там же приведены значения к.п.д. преобразования и передачи энергии основными элементами. Первичным источником энергии является топливо (уголь, газ, мазут, торф, горючие сланцы и др.). Теплота, выделя-

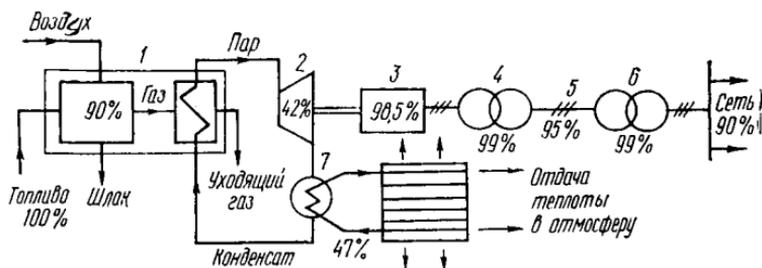


Рис. 2.1. Схема тепловой электростанции и линии электропередачи:

1 — котел; 2 — турбина; 3 — генератор; 4 — повышающий трансформатор; 5 — линия электропередачи; 6 — понижющий трансформатор; 7 — конденсатор.

емая при сжигании топлива в котле 1, испаряет воду и нагревает пар (рабочее тело). Нагретый пар под высоким давлением поступает в турбину 2, приводящую во вращение турбогенератор 3 переменного тока. Электроэнергия, вырабатываемая турбогенератором, поступает в повышающий трансформатор 4, линию электропередачи 5, понижающий трансформатор 6 и далее в сеть, питающую потребители электроэнергии.

Современные ТЭС строятся по блочной системе. Энергетический блок состоит из парового котла и паровой турбины, соединенной с турбогенератором.

Основным топливом для ТЭС долгое время являлся уголь, однако в последнее десятилетие заметно увеличилась доля газа и жидкого топлива. Динамика изменения структуры топливного баланса ТЭС в процентах иллюстрируется данными табл. 2.3.

Т а б л и ц а 2.3

Топливо, %	Годы			
	1960	1965	1970	1975
Уголь	70,9	54,6	46,1	42,6
Газ	12,3	25,6	26,0	26,8
Жидкое топливо	7,5	12,8	22,5	25,1
Торф	7,0	4,5	3,1	3,5
Сланцы	1	1,5	1,7	1,6
Прочие	1,3	1,0	0,6	0,4

Установленная мощность ТЭС непрерывно возрастает. Если в 1940 г. она составляла 10,6 млн. кВт, то в 1980 г. возросла до 210 млн. кВт. Основная тенденция современного развития ТЭС — повышение мощности электростанций (до 6...8 млн. кВт) и энергоблоков, переход от блоков мощностью 200 и 300 МВт к блокам мощностью 500, 800 и 1200 МВт. Рост мощностей энергоблоков характеризуется данными табл. 2.4.

Укрупнение агрегатов и суммарной мощности ТЭС приводит к повышению к.п.д., снижению стоимости киловатта установленной мощности станций за счет снижения затрат на строительство, уменьшения площадей железнодорожных и автомобильных путей, сокращения обслуживающего персонала и др. Удельная численность обслужи-

Таблица 2.4

Вид мощности	Мощность энергоблоков, тыс. кВт			
	1960 г.	1970 г.	1975 г.	1980 г.
Суммарная, введенная за год	3085	9815	7915	10 000
Средняя	54	138	158	—
Максимальная	200	300	800	1200

Таблица 2.5

Мощность, тыс. кВт	Количество и единичная мощность блока, тыс. кВт	Удельная численность персонала электростанций, чел./тыс. кВт	
		на твердом топливе	на жидком и газообразном топливе
400	4×100	2,1	1,36
1200	6×200	1,24	1,1
2400	8×300	0,93	0,75
2400	3×800	0,58	0,51

вающего персонала в зависимости от мощности электростанции приведена в табл. 2.5.

Гидравлические электростанции. Наша страна занимает первое место в мире по запасам гидравлической энергии. Всего в стране обследовано более 4400 крупных, средних и малых рек. Потенциальная энергия в этих реках оценивается в 3338 млрд. кВт·ч в год. Это более чем в три раза превышает выработку электроэнергии всеми электростанциями страны за 1977 г. Однако запасы гидроэнергии в нашей стране распределены крайне неравномерно. Более 82% этих запасов сосредоточено в Сибири, на Дальнем Востоке и в Средней Азии. Кроме того, не весь потенциал рек удастся выгодно использовать. Расчеты показывают, что можно использовать примерно 2/3 от приведенной выше цифры.

Развитию гидроэнергетики уделялось большое внимание с первых лет становления Советской власти. Первенец советской гидроэнергетики — Волховская ГЭС — строилась под пристальным наблюдением В. И. Ленина. В течение 11 лет (1921—1932 гг.) развернуто гидростроительство в Армянской ССР, Грузинской ССР, Узбекской

ССР, Таджикской ССР. В апреле 1932 г. пущен первый агрегат Днепровской ГЭС, самой крупной в Европе в то время. Затем было начато сооружение каскадов Волжских ГЭС, каскадов шести ГЭС на Днестре, каскадов Камы, Чирчика, Свири, Риони и, наконец, наиболее мощного Ангаро-Енисейского каскада с крупнейшими ГЭС мира — Братской, Красноярской и Саяно-Шушенской. Характеристики наиболее крупных ГЭС СССР приведены в табл. 2.6.

Т а б л и ц а 2.6

Гидроэлектростанция	Река	Установ- ленная мощность, МВт	Выработка энергии, млн. кВт·ч ×ч/год
Красноярская им. 50-летия СССР	Енисей	6000	16433,2
Братская им. 50-летия Великого Октября	Ангара	4125	23856,9
Волжская им. XXII съезда КПСС	Волга	2541	8717,3
Волжская им. В. И. Ленина	Волга	2300	7342,4
Усть-Илимская	Ангара	3600	3591,9
Саратовская им. Ленинского комсомола	Волга	1360	4127,9
Бухтарминская	Иртыш	675	2285,4
Иркутская	Ангара	662,4	4177,7
ДнепроГЭС-II	Днепр	652,8	1421,9
Днепровская им. В. И. Ленина	Днепр	650,6	2274,1
Кременчугская им. 50-летия Ве- ликой Октябрьской социалисти- ческой революции	Днепр	625	1519
Чарвакская	Чирчик	600	864
Горьковская	Волга	520	1200,9
Камская	Кама	504	1476

В одиннадцатой пятилетке предусмотрено дальнейшее развитие гидроэнергетики. Предполагается построить крупные ГЭС на реках Сибири, Дальнего Востока и Средней Азии, а также гидроаккумулирующие электростанции в Европейской части СССР и довести выработку электроэнергии на ГЭС до 230...235 млрд. кВт·ч.

Атомные электростанции. Первая АЭС в нашей стране построена в 1954 г. Она имела мощность 5 тыс. кВт. На первом этапе в атомных реакторах было освоено использование изотопов урана-235, которые распадаются под действием медленных (тепловых) нейтронов на два осколка. Эти реакторы получили название реакторов на

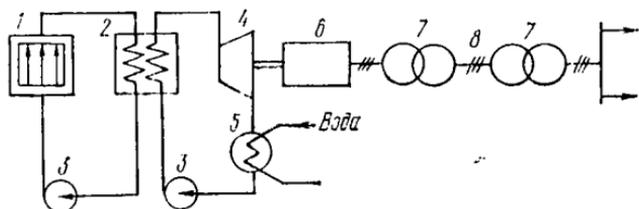


Рис. 2.2. Схема атомной электростанции и линии электропередачи:

1 — реактор; 2 — теплообменник; 3 — насосы; 4 — турбина; 5 — конденсатор; 6 — генератор; 7 — повышающий трансформатор; 8 — линия электропередачи; 9 — понижающий трансформатор.

медленных нейтронах. В последующем были созданы реакторы на быстрых нейтронах (бриддеры), в которых в процесс деления вовлекается уран-238.

Схема АЭС показана на рис. 2.2. Ядерное топливо загружается в реактор 1. Теплота, выделяющаяся за счет деления ядер урана в реакторе, нагревает теплоноситель (воду под давлением, газ и др.), циркулирующий в замкнутом контуре для предотвращения радиоактивного заражения. В теплообменнике 2 теплота передается во второй контур, где образуется пар с высокой температурой и давлением, вращающий турбину 4. Устройство и назначение остальных элементов АЭС аналогичны соответствующим элементам ТЭС, работающих на обычном топливе. Выгоревшее ядерное топливо периодически заменяется.

Установленная мощность АЭС в нашей стране из года в год возрастает. Данные действующих в СССР АЭС приведены в табл. 2.7.

В СССР строительство АЭС базируется на реакторах типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) и РБМК (реактор большой мощности — кипящий).

Первоочередной задачей является освоение головного энергоблока мощностью 1000 МВт с реактором ВВЭР — 1000 с двумя турбинами по 500 МВт на 1500 об/мин. Предстоит освоение производства турбин и турбогенераторов 1000 МВт на 1500 об/мин. Для реакторов типа РБМК-1500 должны быть изготовлены турбины мощностью 750 МВт на 3000 об/мин.

Наиболее крупной проблемой является освоение АЭС с реакторами типа БН на быстрых нейтронах, в которых в процесс деления вовлекается уран-238. В 1972 г. в г. Шевченко была пущена первая в мире АЭС с реактором БН-350 мощностью 350 МВт. На Белоярской АЭС

Таблица 2.7

АЭС	Мощность, МВт	Год в вода мощностей в эксплуатацию
Белоярская	100	1964
	200	1968
Нововоронежская	210	1964
	365	1969
	440	1971
	"	1972
Кольская	"	1973
	"	1974
Билибинская	12	1973
	"	1974
	"	1975
Ленинградская	"	1976
	1000	1973
	1000	1975
	350	1973
Шевченко	440	1976
Армянская	440	1976
Курская	1000	1976

сооружается опытно-промышленный блок с реактором БН-600.

В ближайшие 20—25 лет будет развиваться атомная энергетика, главным образом с освоенными реакторами на тепловых нейтронах. Однако в этом типе реактора уран используется только на 0,7% (уран-235). Очевидно необходимо использовать 99,3% урана-238, но для этого предстоит преодолеть значительные технические трудности.

2.6. ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Напряжение мощных турбогенераторов по техническим причинам не превышает 25 ... 30 кВ. Поэтому при мощности турбогенераторов, равной сотням мегаватт, величина тока достигает десятков тысяч ампер. Передача таких токов на большие расстояния практически невозможна, так как для этого потребовались бы провода очень больших сечений, кроме того, потери энергии при передаче, пропорциональные квадрату тока, также были бы весьма значительными. Поэтому с ростом мощностей напряжения ЛЭП должны повышаться. Типовые напряжения ЛЭП составляют 110, 220, 330, 500, 750 кВ и вы-

Т а б л и ц а 2.8

Напряжение, кВ	Оптимальная передаваемая мощность, МВт	Длина ЛЭП, км
110	35...50	100
220	100...200	160...200
330	300...400	200...300
500	до 1000	500...1200
750	1800...2500	1500...1200
1150	4000...6000	2000

бираются в зависимости от передаваемой мощности и длины линии в соответствии с данными табл. 2.8. Распределительные сети имеют напряжения 110, 35, 10, 6 кВ. В настоящее время проектируется ЛЭП напряжением 1150 кВ переменного тока и ЛЭП 1500 и 2200 кВ постоянного тока для передачи электроэнергии в центр страны от Экибастузского (Северный Казахстан) и Канско-Ачинского (Западная Сибирь) энергокомплексов. Первостепенное значение имеет магистраль 1150 кВ для связи объединенных энергосистем Сибири, Казахстана, Урала. Линии постоянного тока дадут возможность повысить устойчивость объединенных энергосистем. Проектируется линия постоянного тока Экибастуз — Тамбов напряжением 1500 кВ (± 750 кВ), мощностью 6 млн. кВт, что позволит передать в центральные районы более 36 млрд. кВт·ч/год. К.п.д. линии равен 85% с учетом потерь в преобразователях.

Для более экономичного использования оборудования и энергетических ресурсов района электростанции объединяются в энергетические системы. Это также увеличивает надежность электроснабжения потребителей, так как при перегрузке или аварии на одной из электростанций потребители не отключаются, а начинают получать электроэнергию от других станций.

В 1977 г. 11 энергетических систем СССР имели суммарную мощность 198011,4 МВт, т. е. 90,8% мощности всех электростанций СССР.

Энергетические системы объединяются между собой в единую энергосистему (ЕЭС), что дает еще большие преимущества. В 1977 г. к ЕЭС присоединилась крупнейшая объединенная энергосистема Сибири по межсистемной магистрали 500 кВ Урал — Казахстан — Сибирь.

В 1965 г. 43 энергосистемы были объединены в Единую Европейскую энергосистему (ЕЕЭС) и 4 энергорайона суммарной мощностью 54 млн. кВт.

В настоящее время ЕЕЭС объединяет 63 энергосистемы вместе с энергосистемой Народной Республики Болгарии (НРБ). Из ЕЕЭС осуществляется экспорт энергии в параллельно работающие системы НРБ, ВНР, ПНР, ГДР и Финляндии. С подключением системы МНР ЕЭС охватывает территорию от Улан-Батора на востоке до Берлина на Западе.

Важнейшей проблемой является управление энергосистемами с помощью диспетчерской службы и противоаварийной автоматики, создание автоматизированных систем управления (АСУ) с использованием электронных вычислительных машин (ЭВМ). Начальной ступенью АСУ являются системы управления энергетическими агрегатами, линиями электропередач. На начало 1977 г. на трех ТЭС Минэнерго Змиевской, Бурштынской и Молдавской, двух ГЭС — Саратовской и Воткинской введены автоматические системы. В 10-й пятилетке переведены на автоматическое управление крупные энергоблоки 300, 500, 800 и 1200 кВт еще 15 электростанций. На атомных электростанциях предусматривается возможный максимум автоматизации.

Глава 3

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

3.1. ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЗВИТИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

История развития электрической машины тесно связана с основными вехами в истории электротехники.

Первые опыты Х. Эрстеда, показавшие возможность механического взаимодействия проводника с током в магнитном поле, оформленные математически А. Ампером в его трудах по электродинамике, предопределили возможность создания одного из типов электромеханических преобразователей — электрических двигателей.

Ученые пришли к выводу, что для создания электромагнитных систем непрерывного действия при ограниченной протяженности магнитного поля необходимо использовать круговое взаимное перемещение магнитов и проводников с током. Еще в 1821 г. Фарадей показал

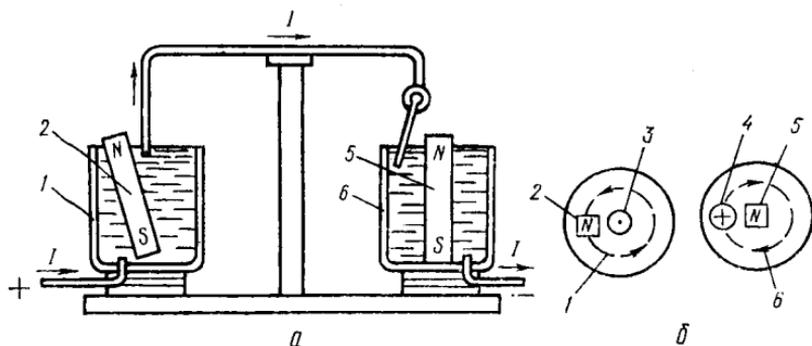


Рис. 3.1. Установка Фарадея:
 а — устройство; б — схема движения.

возможность построения электродвигателей на экспериментальной установке, устройство которой показано на рис. 3.1.

Установка состоит из двух заполненных ртутью сосудов 1 и 6, в которых укреплены подвижный 2 и неподвижный 5 магниты. В эти же сосуды опущены концы подвижного 4 и неподвижного 3 проводников. По общей цепи проходит ток I , при взаимодействии проводников с током в магнитном поле подвижные системы начинают перемещаться по круговым траекториям.

Интересно отметить, что в первых демонстрационных образцах электрических машин были использованы униполярные конструкции, т.е. в рабочей зоне существовало магнитное поле одной полярности. Такой был принцип устройства, описанного в книге П. Барлоу «Исследование магнитных притяжений» в 1824 г. и известной под названием «Колеса Барлоу». Два медных колеса, посаженных на одной оси, располагались между полюсами магнита и соприкасались с ртутными ванночками. При прохождении тока колеса вращались. Сходную конструкцию имел и первый электромашинный генератор, называемый диском Фарадея (рис. 3.2). Между полюсами магнита вращался медный диск. Направление вращения показано стрелкой. На валу и периферии диска размещались скользящие контакты, между которыми возникала разность потенциалов. В этой машине диск вращался в магнитном поле одной полярности в отличие от нормальных вращательных машин, у которых по окружности размещены полюса разной полярности. Поэтому подобные машины получили название униполярных.

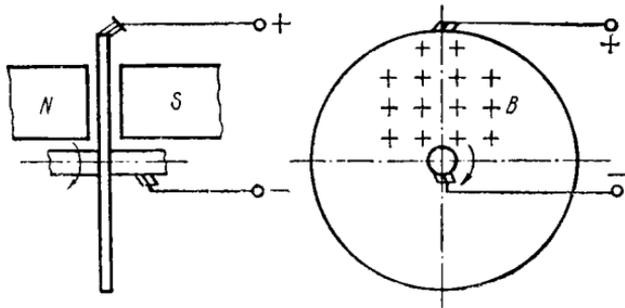


Рис. 3.2. Униполярная машина (диск Фарадея).

На первом этапе разработок было предложено много конструкций двигателей колебательного движения. Одним из первых был прибор Дж. Генри, описанный в статье «О качественном движении, производимом магнитным притяжением и отталкиванием» в 1831 г. Устройство прибора Дж. Генри показано на рис. 3.3. Электромагнит 2 может качаться в вертикальной плоскости. При наклоне качалки контакты-выводы катушек электромагнита входят в ртутные ванночки, обеспечивая подвод тока. При этом взаимодействие электромагнита 2 и постоянных магнитов 1 обеспечивает отталкивание качалки в обратную сторону. При обратном наклоне переключается обмотка электромагнита (меняется его полярность и система непрерывно раскачивается). Мощность построенной модели была всего 0,044 Вт и практического значения не имела.

В дальнейшем конструкторы все чаще использовали в машинах вращательное движение. В первых конструкциях наиболее отчетливо выступал сам принцип взаимо-

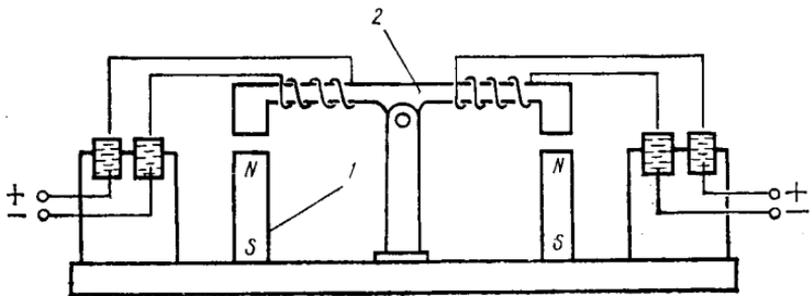


Рис. 3.3. Устройство прибора Дж. Генри.

действия подвижной и неподвижной магнитных систем. На обеих системах крепились магниты или электромагниты, связанные с остальными конструктивными элементами только механически. Подобная конструкция не только увеличивала габариты машины, но и создавала неравномерное магнитное поле в рабочей зоне машины. При взаимодействии подобных систем на валу создавался существенно неравномерный, пульсирующий момент.

Один из первых практически применимых двигателей был создан Б. С. Якоби. По его инициативе в Петербургской Академии наук была организована комиссия по исследованию применения электромагнитов к движению машин. Вместе с академиком Э. Х. Ленцем им были заложены основы теории электрических машин. В 1834 г. Якоби построил и представил Парижской академии наук описание электродвигателя с вращательным движением двух групп П-образных электромагнитов. Четыре магнита были расположены на неподвижной части, четыре — на вращающейся.

Неподвижная часть (статор) и подвижная (ротор) совмещены в осевом направлении. Для обеспечения непрерывного вращения необходимо было менять полярность электромагнитов, для чего использовался электро-механический переключатель довольно сложной конструкции, разработанный Якоби.

Однако подобная конструкция имела ряд недостатков: большая осевая нагрузка подшипников, трудность увеличения мощности двигателя. В 1837 г. американец Девенпорт построил электродвигатель, в котором ротор и статор были совмещены в радиальном направлении и установлен более простой вращающийся коммутатор. Использование объема в конструкции Девенпорта было плохое, применение на статоре низкокачественных постоянных магнитов понижало мощность установки. Однако Якоби обратил внимание на прогрессивные решения в конструкции и разработал новый электродвигатель (рис. 3.4), имеющий все элементы современной машины. Для повышения мощности своих двигателей Якоби использовал объединение на одном валу несколько маломощных элементарных двигателей.

Уже первое применение электродвигателей для привода силовой установки (бот Якоби в 1838 г.) показало необходимость разработки более экономичных источников электрической энергии.

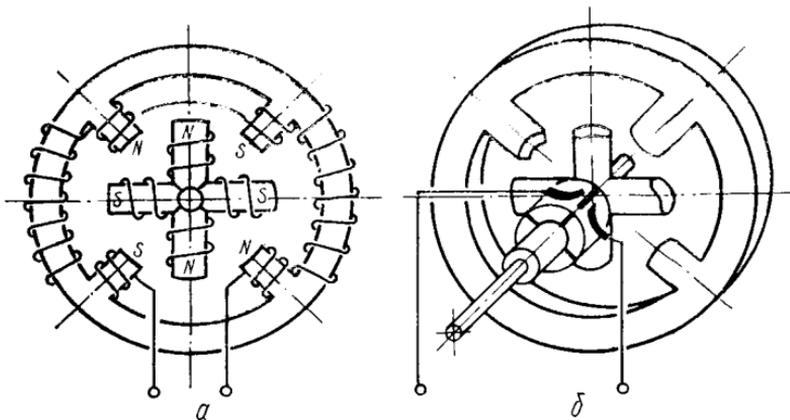


Рис. 3.4. Двигатель Якоби:
a — принципиальная схема; *б* — конструкция.

Дальнейшее развитие конструкции электродвигателя связано с более органическим сочетанием магнитных систем с остальными элементами и использованием распределенных обмоток, создающих магнитную систему без явно выраженных полюсов. Электродвигатель А. Пачинотти (1860 г.) имел ротор кольцеобразной формы с зубцами, что облегчало крепление обмотки и уменьшало магнитное сопротивление. Концы катушек обмотки подводились к коллектору. Подвод тока к пластинам коллектора осуществлялся роликами. Обмотка электромагнитов включалась последовательно с яркой обмоткой.

Пачинотти указал на возможность использования предложенной конструкции в качестве генератора. Однако двигатель Пачинотти не получил распространения, так как не было экономичных источников электрической энергии.

Развитие конструкции генераторов шло параллельно и в какой-то степени независимо от разработки конструкции электродвигателей.

Если в первых генераторах вращалась система возбуждения — постоянные магниты, то в дальнейшем было признано более рациональным размещать на вращающейся части рабочую обмотку, концы которой подсоединялись к вращающемуся переключателю — коллектору. Одним из первых генераторов такого типа, получивших практическое применение, был генератор Якоби (1842 г.),

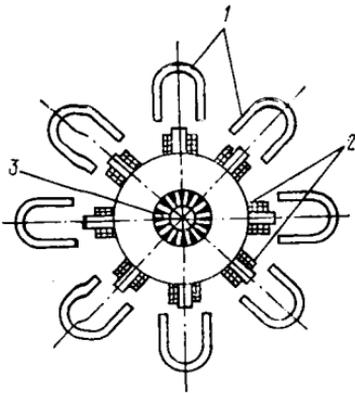


Рис. 3.5. Схема генератора «Альянс».

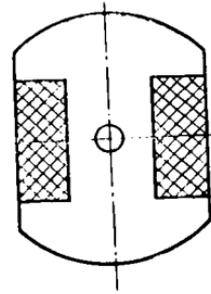


Рис. 3.6. Двухавтовый якорь.

названный им магнитоэлектрической батареей. Генератор был предназначен для электрического взрывания мин и принят на вооружение гальванических команд русской армии.

Дальнейший толчок в разработке новых типов генераторов был обусловлен развитием гальванотехники и применением дуговых ламп, особенно для маяков. Работы над созданием более мощных генераторов были начаты в прошлом столетии в Бельгии, Франции и Англии. В одном агрегате объединялось множество однотипных, сравнительно маломощных, элементов. Для производства машин в Париже была организована электропромышленная компания «Альянс» (1856 г.). В генераторах «Альянс» (рис. 3.5) на чугунной станине радиально, в несколько рядов, закреплялись постоянные магниты 1. На валу располагались кольца с закрепленными в них стержнями с катушками 2 (электромагниты). Концы катушек соединялись в группы, причем схема соединения могла меняться. Это позволяло менять выходные данные генератора — получать большой ток при малом напряжении для целей гальванопластики или электролиза, или ток меньшей величины, но повышенного напряжения, для питания дуговых ламп. Выводы групп были подведены к вращающемуся коллектору 3 из 16 пластин, по которым перемещались неподвижные ролики, выполняющие роль токосъёмных контактов (щеток). При изменении частоты вращения центробежный регулятор сдвигал ролики на оп-

ределенный угол, что позволило стабилизировать напряжение при изменении скорости.

В течение 1857—1865 гг. в эксплуатации были около 100 машин «Альянс», приводимых в движение паровыми машинами мощностью 6...10 л.с. В процессе эксплуатации ярко проявились все недостатки этой конструкции — быстрое старение низкокачественных железоуглеродистых магнитов, перегрев катушек, намотанных на стержни, низкое использование массы и объема конструкции, большие пульсации выпрямленного тока.

В 1856 г. Э. Сименс предложил использовать якорь двутаврового сечения (рис. 3.6), создающий меньшее магнитное рассеяние, чем стержневой, хотя обмотка по-прежнему представляла катушку большого сечения. При этом обмотка плохо отдавала теплоту, что ограничивало мощность устройства. Подобные якоря и в настоящее время используются в некоторых маломощных машинах, например в магнето.

В 1854 г. был выдан английский патент на машину с самовозбуждением, точнее со смешанным возбуждением, так как в предложенной конструкции наряду с электромагнитами использовались постоянные магниты, которые были необходимы для того, чтобы обеспечить начальное возбуждение. Использование самовозбуждения, т.е. питание электромагнитов системы возбуждения от рабочей цепи самого генератора, позволяло существенно упростить генераторную установку, исключить вспомогательный источник энергии.

В 1850—1860-х гг. был разработан принцип самовозбуждения и построен первый генератор с самовозбуждением.

Большой шаг по пути к созданию современной машины был сделан в 1870 г., когда З. Грамм, сотрудник фирмы «Альянс» в одной конструкции использовал принцип самовозбуждения и кольцевой якорь с непрерывной обмоткой. В патенте на свою машину (рис. 3.7). Грамм указал, что сердечник якоря может изготавливаться из пучка стальных проволок, это должно значительно снизить потери от вихревых токов. Таким образом, с одной стороны, Грамм сделал шаг назад по сравнению с зубчатым якорем Пачинотти, но, с другой стороны, используя наборной якорь, улучшил энергетические показатели машины. Хотя основная конструкция была двухполюсная, Грамм предусмотрел возможность создания

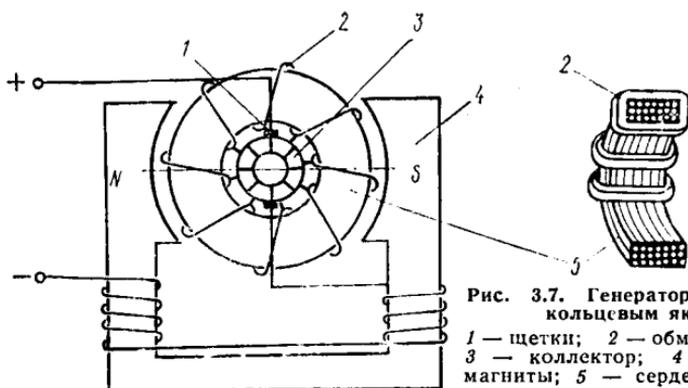


Рис. 3.7. Генератор Грамма с кольцевым якорем:

1 — щетки; 2 — обмотка якоря; 3 — коллектор; 4 — электромагниты; 5 — сердечник якоря.

многополюсных машин. Коллектор и схема соединения обмотки имели вполне современный вид, что обеспечивало практически постоянный ток, необходимый и потребителям, и для самовозбуждения. По сравнению с машинами «Альянс» генератор Грамма имел значительно меньшие размеры. Благодаря своим достоинствам машина Грамма быстро нашла широкое распространение не только в качестве генератора, но и как двигатель.

Дальнейшее усовершенствование конструкции электрических машин определялось внимательным изучением как самой конструкции машины, так и физических процессов, происходящих в ней, т. е. созданием общей теории электрических машин.

В 1873 г. был разработан барабанный якорь, обмотка которого располагалась по его рабочей поверхности, что существенно повысило ее использование, так как в кольцевом якоре внутренние стороны витков и лобовые части не участвуют в электромагнитном взаимодействии. В барабанном яркое не работают только лобовые части витков, соединяющие между собой активные проводники. С 1878 г. барабанные якоря стали делать зубчатыми, а катушки обмотки укладывать в пазы, что уменьшило немагнитный зазор в магнитной цепи и, следовательно, ее магнитное сопротивление. Кроме того, обмотка, уложенная в пазы, более просто и надежно закреплялась. Кстати, в настоящее время в связи с ростом магнитных нагрузок и быстрым насыщением зубцов иногда снова применяют гладкие якоря, т. е. наблюдается как бы спираль в развитии конструкции, но на новом, более высоком уровне.

В 1880 г. Т. Эдисон предложил с целью уменьшения потерь в сердечнике якоря выполнять его шихтованным, т.е. набранным из отдельных тонких стальных листов, оклеенных бумагой или лакированных (для изоляции).

В том же 1880 г. было предложено выполнять сердечник из отдельных пакетов, разделенных вентиляционными каналами. Это позволило уменьшить нагрев сердечника при создании мощных электрических машин. С 1885 г. начали применять шаблонную обмотку, что существенно упростило технологию производства обмоток и повысило их качество. В эти же годы были созданы компенсационная обмотка и дополнительные полюса, что позволило улучшить работу щеточно-коллекторного узла машин постоянного тока.

Одновременно развивались исследования электромагнитных процессов в электрических машинах. В 1840 г. Б. С. Якоби описал явление противо-э. д. с. В 1847 г. Э. Х. Ленц открыл явление, получившее название реакции якоря, и предложил устанавливать щетки на физическую нейтраль. Математический анализ процессов в машине с самовозбуждением был дан в 60-х годах XIX в. Дж. Максвеллом. Для расчета магнитной цепи большое значение имели работы А. Г. Столетова по исследованию магнитных свойств «мягкого железа» (1871 г.). Исследования потерь в стали при перемагничивании дали научную основу для расчета конструкции электрической машины. В это же время были выполнены важные работы по выводу закона магнитной цепи.

Все это создало теоретические основы для научной разработки конструкции электрических машин.

Развитие электромашиностроения шло параллельно с развитием технологии. Разрабатывались новые магнитные и изоляционные материалы. Для изоляции коллекторных пластин начали применять слюду. В 1890-х годах на ее основе создают изоляционные материалы — миканит, микаленту, микафолий, которые применяются и до настоящего времени.

3.2. ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЗВИТИИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Развитие и совершенствование электрических машин шло параллельно с общим развитием электротехники, создававшим потребность в электрических машинах и

предпосылки для их быстрого внедрения. Создание и распространение свечи Яблочкова дало толчок к промышленному использованию переменного тока. В свече Яблочкова при питании постоянным током положительный электрод сгорал быстрее отрицательного. Положительный электрод делали большого сечения, но неравномерность горения оставалась. В то же время при питании переменным током эта проблема снималась. В результате появился спрос на однофазные генераторы переменного тока, которые раньше не находили практического применения.

Появившиеся в 1870-х годах лампы накаливания одинаково работали на постоянном и переменном токе, однако передача энергии и ее распределение между источниками, «дробление электрической энергии» по Яблочкову удобнее осуществлялось в системах переменного тока с применением трансформаторов.

Поэтому вначале развитие машин переменного тока было непосредственно связано с развитием электрического освещения. До 1870-х годов генераторы переменного тока выполнялись либо как демонстрационные модели, либо на базе машин постоянного тока с заменой коллектора двумя кольцами. В 1876 г. П. Н. Яблочков совместно с заводом Грамма создал несколько конструкций генераторов переменного тока для питания изобретенных им свечей. В этих генераторах якорь с рабочей обмоткой был неподвижен, а на роторе размещалась система возбуждения — электромагниты, которые питались через кольца постоянным током. Катушки обмотки якоря соединялись так, чтобы э.д.с. и токи одной ветви совпадали по фазе (складывались). Принципиальная схема этого генератора соответствовала современным синхронным генераторам. Однако рост мощности генераторов в первый период был ограничен резким возрастанием потерь в сердечниках катушек. Эти потери настолько возрастали с ростом мощности, что был выпущен ряд машин без сердечников. Конечно, потери при этом снизились, но резко возросло магнитное сопротивление, что уменьшало эффективность машин и увеличивало ее размеры.

По мере распространения энергетических систем переменного тока возрастал интерес к двигателям, работающим на переменном токе. Кажется, что принципиальных трудностей нет, поскольку любая электрическая

машина обратима. Уже в 1841 г. Ч. Уитстон построил модель синхронного двигателя. Трудности, возникающие при пуске однофазных синхронных двигателей, были непреодолимыми препятствиями для их практического использования. Поэтому первыми двигателями переменного тока, нашедшими практическое применение, были коллекторные двигатели, аналогичные по конструкции машинам постоянного тока. Коллекторные однофазные двигатели переменного тока с последовательным возбуждением (обмотка возбуждения включена последовательно с якорем) были предложены в 1885 г.

Примерно в то же время (1886 г.) был разработан так называемый репульсионный двигатель. Этот коллекторный двигатель имел такие же характеристики, как двигатель последовательного возбуждения, но энергия в якорь передавалась в нем за счет электромагнитной связи, как в трансформаторе.

Однако первые конструкции коллекторных двигателей переменного тока имели значительные потери, работа щеточного контакта была неудовлетворительная (искрение на щетках). Дальнейшее развитие электромашиностроения непосредственно зависело от новых конструктивных и научных разработок.

К началу 1880 года в значительной мере была отработана конструкция машин постоянного тока, появились сравнительно мощные генераторы переменного тока. При создании центральных электрических станций и линий резко проявились недостатки систем постоянного и однофазного переменного тока. Кроме того, отсутствие простых и надежных двигателей переменного тока сдерживало дальнейшее распространение систем переменного тока. Определяющим в дальнейшем развитии электротехники явилось создание многофазных двигателей переменного тока с вращающимся магнитным полем, т. е. полем, вращающимся относительно создавшей его системы.

В 1879 г. У. Бейлисс создал прибор, в котором вращение магнитного поля осуществлялось неподвижной четырехполюсной системой электромагнитов, которые питались от источника постоянного тока через специальный переключатель. При этом на электромагниты подавались чередующиеся импульсы тока. Полюса намагничивались по кругу, в результате чего магнитное поле изменяло направление в пространстве. Над полюсами был

повешен медный диск, что напоминало постановку опыта Д. Араго (1824 г.). В опыте Араго медный диск, вращающийся возле магнитной стрелки, как бы увлекает ее за собой. Тогда же наблюдалось и обратное явление — вращение постоянного магнита увлекало за собой медный диск. Впервые объяснил это явление Фарадей, который показал, что в проводниковых контурах (диске) наводится э.д.с. и появляются токи, взаимодействующие с магнитом. В приборе Бейлисса диск приходил во вращение под действием неподвижной магнитной системы, создающей вращающееся магнитное поле.

Явление вращающегося магнитного поля в современном понимании было открыто в 1888 г. почти одновременно и независимо друг от друга итальянским ученым Г. Феррарисом и югославским ученым Николой Тесла, работавшим в Америке. Надо отметить, что первые идеи у них появились значительно раньше. Они показали, что если две катушки, сдвинутые в пространстве на 90° , питать переменными токами, сдвинутыми по фазе (во времени) на 90° , то суммарное магнитное поле, не меняясь по величине, вращается с постоянной скоростью, определяемой частотой питающего тока. Г. Феррарис выполнил несколько моделей двухфазных двигателей, в которых вращающееся поле взаимодействовало с медным цилиндром (ротором) и тот вращался. Для получения токов, сдвинутых по фазе на 90° , при использовании однофазного переменного тока, Феррарис включал в цепь обмоток фазосдвигающие элементы — резисторы и индуктивные сопротивления.

Исходя из ошибочных теоретических положений, Г. Феррарис получил в результате анализа работы асинхронных двигателей вывод, что их к.п.д. не может быть выше 50%.

Н. Тесла пошел другим путем. Для питания двухфазных двигателей он разработал и использовал двухфазный генератор. Линия питания выполнялась четырехпроводной либо трехпроводной с одним общим проводом для двух фаз. По системе Тесла фирмой «Вестингауз» был построен ряд электростанций, из которых наибольшей была Ниагарская гидроэлектростанция. Однако эта система и ее элементы имели целый ряд недостатков — большой расход материалов для линии, неудачная конструкция самого двигателя, что ухудшало его характеристики. Основным недостатком было использование на

статоре полюсов с сосредоточенной обмоткой, аналогично машинам постоянного тока. Это ухудшало распределение магнитного поля по окружности машины и приводило к ухудшению характеристик. Кроме того, на роторе также были сосредоточенные обмотки повышенного сопротивления, что в свою очередь ухудшало характеристики и усложняло пуск.

Двухфазный ток не получил дальнейшего распространения в связи с тем, что в Европе в это время были сделаны новые изобретения, использующие более совершенные трехфазные системы. Наибольших успехов в этой области добился русский электротехник М. О. Доливо-Добровольский (1862—1919 гг.), который по праву считается основателем трехфазной электротехники.

В первом же патенте Доливо-Добровольского от 8 марта 1889 г. был заявлен ротор с беличьей клеткой, который используется до настоящего времени (рис. 3.8).

С целью уменьшения размеров машины М. О. Доливо-Добровольский начал исследовать многофазные системы и остановился на трехфазной. Для питания подобных систем он разработал вначале преобразователь, а затем и трехфазный синхронный генератор и показал возможность использования трехпроводной симметричной системы для передачи электроэнергии.

При разработке конструкции статора он отказался от явно выраженных полюсов и перешел к распределенной обмотке, вначале кольцевой, а затем барабанной.

При испытаниях и эксплуатации первых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором выявились их недостатки — большой пусковой ток, что нарушало работу маломощных энергосистем, и сравнительно ма-

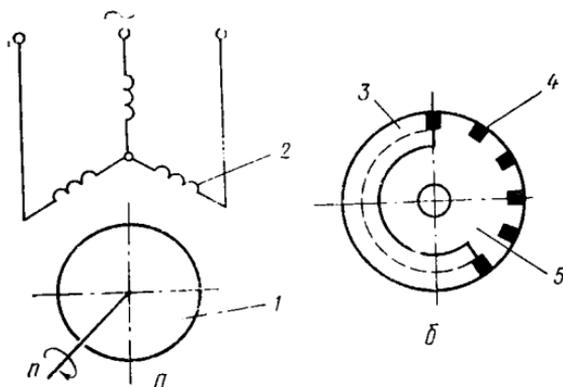


Рис. 3.8. Асинхронный двигатель:

а — принципиальная схема; *б* — ротор с беличьей клеткой; 1 — короткозамкнутый ротор; 2 — трехфазная обмотка статора; 3 — замыкающее кольцо; 4 — медные стержни; 5 — стальной шихтованный цилиндр.

лый пусковой момент. Для улучшения пусковых свойств асинхронных двигателей М. О. Доливо-Добровольский предложил конструкции двухклеточных и фазных роторов. Таким образом в кратчайший срок он решил все основные задачи не только по созданию двигателей переменного тока, но и всей системы трехфазного тока. Такой быстрый и, смело можно сказать, эпохальный успех М. О. Доливо-Добровольского объясняется рядом причин. Основное заключалось в том, что его труды отвечали насущным требованиям эпохи, совпадали с основным направлением технического прогресса. Сам он был галантливым образованным инженером и ученым, обладавшим огромной работоспособностью, который смог не только найти эффективное решение поставленной проблемы, но и обеспечить ее инженерную разработку и скорейшее внедрение. Последнее облегчалось тем, что М. О. Доливо-Добровольский был одним из технических руководителей крупнейшей электротехнической фирмы «АЕГ». Это давало ему широкие возможности проведения экспериментальных исследований и облегчало внедрение своих разработок в условиях наиболее развитой в то время германской электротехнической промышленности.

Блестящей демонстрацией возможностей трехфазной системы явилась экспериментальная Лауфен-Франкфуртская электропередача, продемонстрированная на Международном электротехническом конгрессе и электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне в 1891 г. В кратчайший срок, менее чем за два года, М. О. Доливо-Добровольский разработал и смог продемонстрировать на выставке асинхронные двигатели мощностью 75 кВт, 1,5 кВт и 100 Вт, которые использовались для привода различных механизмов — насоса, генератора постоянного тока и вентилятора. Одновременно были разработаны многие элементы системы электропередачи, синхронный трехфазный генератор и тогда же в значительной мере на основе работ Доливо-Добровольского была отработана конструкция современного трехфазного силового трансформатора.

Принцип индуктивной связи двух обмоток на одном стальном сердечнике был впервые открыт М. Фарадеем. В дальнейшем в работах Якоби и Румкорфа индукционные катушки использовались для получения больших напряжений. П. Н. Яблочков использовал индукционные

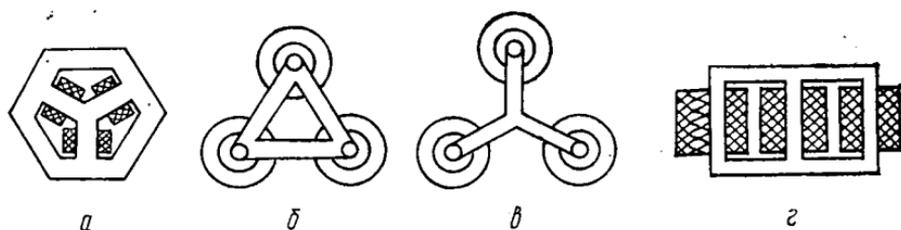


Рис. 3.9. Эволюция конструкции трехфазного трансформатора.

катушки в качестве трансформаторов с разомкнутым сердечником. В 1882 г. на Всероссийской промышленной выставке И. Ф. Усагин показал, что предложение П. Н. Яблочкова можно использовать для независимого питания различных потребителей энергии. Однако во всех этих работах использовалось последовательное включение первичных обмоток и разомкнутые магнитные системы. В 1884 г. был создан первый трансформатор с замкнутым сердечником из стальной проволоки или полос, разделенных изоляцией для уменьшения потерь.

Первый промышленный трансформатор для передачи энергии однофазного тока высокого напряжения был разработан в 1885 г. венгерскими электротехниками М. Дери, О. Блати и К. Циперновским. М. Дери в том же году получил патент на параллельное включение первичных и вторичных обмоток трансформаторов. Они же впервые применили термин «трансформатор».

При разработке трехфазных систем М. О. Доливо-Добровольский столкнулся с проблемой трехфазного трансформатора. Интересен путь мышления изобретателя и развитие самого изобретения. Применение трех однофазных трансформаторов возможно, но неудобно и неэкономично. Поэтому в 1889 г. он запатентовал первый трехфазный трансформатор с радиальным расположением сердечников (рис. 3.9, а). Эта конструкция повторяла конструкцию трехфазных двигателей без воздушного зазора. Затем было предложено несколько более компактных конструкций трансформаторов с симметричным расположением сердечников (рис. 3.9, б, в). Наконец в 1891 г. был изобретен трансформатор с расположением сердечников в одной плоскости (рис. 3.9, г). Эта конструкция является основной и в наше время.

Таким образом в 1890-х годах были созданы все основные типы электрических машин и получили развитие

две основные области их применения: производство электроэнергии (электроэнергетика) и преобразование ее в механическую для привода различных производственных механизмов (электропривод). Были созданы первые электрические станции, линии электропередачи и промышленные типы электродвигателей, т. е. были разработаны практически все основные элементы современных электротехнических устройств. В дальнейшем изобретатели и конструкторы улучшали и совершенствовали эти элементы. Прогресс в электромашиностроении связан с улучшением конструкции машин, разработкой теории и конструкции охлаждающих систем, повышением удельных нагрузок за счет применения новых, более совершенных материалов.

3.3. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

По назначению электрические машины могут быть разделены на три вида: генераторы, служащие для преобразования механической энергии в электрическую; двигатели, используемые для преобразования электрической энергии в механическую; преобразователи, предназначенные для преобразования электрической энергии с одними параметрами (род тока, напряжение, частота) в электрическую энергию с другими параметрами.

Во всех электрических машинах используется явление электромагнитной индукции и электромагнитного взаимодействия. Поскольку в современных электрических машинах используется принцип электромагнитного взаимодействия, то, очевидно, в любой машине должна быть система, создающая магнитное поле (система возбуждения), и система рабочих проводников (рабочая обмотка), в которой при перемещении в магнитном поле наводится э.д.с. и протекает ток.

Рассмотрим основные процессы в электрических машинах, воспользовавшись простейшей схемой электромеханического преобразователя (рис. 3.10). Он состоит из магнитной системы, изображенной в виде магнитных полюсов, и проводника, который может свободно перемещаться в магнитное поле. Оценим работу системы в разных режимах.

Если контакты $K1$ и $K2$ разомкнуты и проводник движется в магнитном поле со скоростью v , то в нем наводится э. д. с.



$$e = Blv,$$

пропорциональная индукции B , длине проводника l , находящейся в магнитном поле (активная длина) и скорости взаимного перемещения v . Направление э.д.с., показанное на рисунке, определено по правилу правой руки.

В зависимости от режима работы рабочая обмотка замкнута на нагрузку (сопротивление R_n) через контакт $K1$, что соответствует генераторному режиму, или через контакт $K2$ подключена к источнику электрической энергии (батарея B), что соответствует двигательному режиму.

Если замкнуть контакт $K1$, то в цепи протекает ток

$$i = \frac{e}{R_n + (r_a + r_c)},$$

где $r_a + r_c$ — сопротивление активной части проводника и соединительных проводов.

При этом напряжение на нагрузке, измеряемое вольтметром V ,

$$u = iR_n = e \frac{R_n}{R_n + (r_a + r_c)} = e - i(r_a + r_c).$$

Из полученного выражения видно, что при росте тока нагрузки напряжение уменьшается в пределах от $u = e$ при холостом ходе ($i = 0$) до $u = 0$ при коротком замыкании ($R_n = 0$).

При прохождении тока в проводнике возникает сила взаимодействия с магнитным полем

$$F_{эм} = Bli.$$

Направление силы электромагнитного взаимодействия можно найти по правилу левой руки.

Для обеспечения равномерного движения необходима первичная механическая сила F_1 , которая преодолела бы электромагнитную силу $F_{эм}$ и силы трения $F_{тр}$, т. е.

$$F_1 = F_{эм} + F_{тр}.$$

Уравнение равновесия сил может быть преобразовано в уравнение мощности. Для этого достаточно умножить обе части равенства на скорость

$$P_1 = P_{эм} + p_0,$$

где $P_1 = F_1 v$ — первичная механическая мощность; $P_{эм} = F_{эм} v = Bliv = ei$ — электромагнитная мощность, создаваемая в установке за счет электромагнитного взаимодействия; $p_0 = F_{тр} v$ — мощность потерь холостого хода (при отсутствии нагрузки).

Полезная мощность в генераторном режиме выделяется на сопротивлении нагрузки и равна

$$P_2 = ui = ei - i^2(r_a + r_c) = P_{эм} - p_m,$$

т. е. часть выработанной электромагнитной мощности тратится на внутреннем сопротивлении самого генератора и соединительных проводников.

Коэффициент полезного действия установки

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = \frac{ui}{ui + \Sigma p},$$

где $\Sigma p = p_0 + p_m$ — суммарные потери мощности при преобразовании электроэнергии.

Основными характеристиками генераторов являются зависимость напряжения от тока нагрузки $u = f(i_H)$, называемая внешней характеристикой машины, и зависимость к.п.д. от мощности нагрузки — $\eta = f(P_2)$.

Рассмотрим теперь двигательный режим работы электромеханического преобразователя.

При подключении установки к источнику электроэнергии контактом $K2$ направление тока в активном проводнике (обмотке) изменяется на противоположное по сравнению с генераторным режимом. Взаимодействие проводника с током и магнитного поля создает силу, направленную в сторону движения. При этом в проводнике наводится э.д.с. такого же направления, что и в предыдущем режиме (т. е. согласно обобщенному закону Ленца), действующая против возмущающего первичного воздействия,

в данном случае против напряжения питающей сети (батареи).

Уравнения, характеризующие двигательный режим, могут быть представлены в следующем виде. Уравнение электрического равновесия

$$u = e + i(r_a + r_c).$$

Уравнение механического равновесия

$$F_{эм} = Bli = F_H + F_{тр},$$

т. е. сила электромагнитного взаимодействия при равномерном движении тратится на преодоление внутренних сил трения $F_{тр}$ и сил нагрузки F_H .

Переходя к уравнениям мощностей, находим

$$ui = P_1 = ei + i^2(r_a + r_c) = P_{эм} + p_m;$$

$$F_{эм}v = P_{эм} = P_2 + p_o,$$

где $P_2 = F_H V$ — полезная механическая мощность, развиваемая установкой.

Механическая характеристика двигателя, представляющая при линейном движении зависимость скорости от силы $v = f(F)$, а при вращательном — зависимость частоты (скорости) вращения от вращающего момента $n = f(M)$, является наиболее важной рабочей характеристикой. Для установки с линейным перемещением проводника из рассмотренных уравнений следует, что

$$v = \frac{u - i(r_a + r_c)}{Bl} = \frac{u}{Bl} - \frac{r_a + r_c}{(Bl)^2} \cdot F_{эм},$$

т. е. с ростом нагрузки скорость вращения уменьшается.

К.п.д. машины в двигательном режиме

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} = \frac{ui - \Sigma p}{ui}.$$

Таковы принципиальные соотношения в любой электрической машине.

В реальных машинах изучение рабочих процессов существенно усложняется, так как необходимо учитывать действие магнитного поля рабочих обмоток (реакция якоря), магнитных полей рассеяния и, наконец, тот факт, что по рабочей обмотке протекает переменный ток. Однако общий характер исследуемых зависимостей сохраняется.

Из их рассмотрения можно сделать выводы, которые во многом определяют конструктивное исполнение электрических машин. Для повышения использования объема машины, т.е. для получения большей электромагнитной мощности в том же объеме (габарите), необходимо увеличить либо электромагнитные нагрузки — индукцию и плотность тока (ток) в обмотке, либо скорость взаимного перемещения. Увеличение скорости генераторов обычно ограничено техническими возможностями первичных двигателей, приводящих их во вращение, а двигателей — требованиями производственных установок. Тем не менее в наиболее мощных машинах, таких как турбогенераторы, уже используется максимально возможная скорость, ограниченная пределом механической прочности вращающейся части (ротора).

Таким образом, основная возможность повысить использование объема машины связана с возможностью повышения электромагнитных нагрузок. Но увеличение электромагнитных нагрузок (магнитной индукции и плотности тока) неоднозначно влияет на конструкцию и рабочие характеристики машин. Поэтому увеличение магнитной индукции приводит к насыщению ферромагнитных участков магнитопровода и, следовательно, к росту магнитного сопротивления магнитной цепи. При этом возрастает мощность и габариты электромагнитов системы возбуждения. Кроме того, в частях машины, которые перемагничиваются при работе, возрастают потери, пропорциональные квадрату индукции. С ростом плотности тока растут потери в обмотках пропорционально квадрату плотности тока. Следовательно, при стремлении повысить использование машин конструктор сталкивается с проблемой увеличения нагрева, так как все потери выделяются в виде теплоты. Для надежной работы машины необходимо, чтобы изоляция отдельных частей и особенно обмоток не разрушалась при рабочих нагревах. Применение новых высококачественных изоляционных материалов позволяет сделать машины более легкими и компактными. Существенную роль в обеспечении надежной работы машины играет система охлаждения. Чем более интенсивно отводится теплота с активных частей, тем большие нагрузки можно допустить в них.

Надо отметить, что рост нагрузок ограничен не только указанными факторами. При увеличении нагрузок изменяются все характеристики машины, как правило,

снижается перегрузочная способность. Поэтому при разработке новой конструкции инженер должен находить оптимальное решение с учетом противоречивых факторов и требований. Конструкции современных машин служат примером подобного компромисса.

3.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Электрические машины сегодня работают всюду: в небе, на земле, на море, в космосе. На спутнике устанавливают свыше 100 электродвигателей, полная мощность электроустановки современного тяжелого самолета достигает сотен киловатт; современные станки имеют несколько электродвигателей, обеспечивающих выполнение множества операций; электротранспортные средства — трамвай, троллейбус, поезда метро, электропоезда, различные электробытовые приборы, наконец, современные гигантские электростанции с их сверхмощными генераторами — везде требуются электрические машины различных видов и назначения.

Электрические машины можно классифицировать по различным признакам. На рис. 3.11 представлена основная классификация электрических машин по роду тока, принципу действия и типу возбуждения.

По мощности электрические машины условно делят на микромашины — до 0,6 кВт, машины малой мощности — до 100 кВт, средней — до 1000 кВт и большой мощности — свыше 1000 кВт. В настоящее время предельная мощность машины в единице достигает 1200 тыс. кВт.



Рис. 3.11. Классификация электрических машин.

Существенное влияние на конструкцию машины оказывает рабочая частота вращения. Различают тихоходные машины с частотой вращения до 500 об/мин, машины со средней частотой вращения — до 1500 об/мин, быстроходные — до 3000 об/мин и сверхбыстроходные, частота вращения которых достигает 150 000 об/мин.

Кроме того, машины отличаются по величине рабочего напряжения, которое меняется в пределах от долей вольта до десятков тысяч вольт.

Не менее существенное влияние на конструкцию оказывает исполнение машины (открытое, защищенное, закрытое, взрывобезопасное), вид крепления, система вентиляции и охлаждения.

Основные данные машины приводятся в паспорте, где указаны тип, род тока, напряжение, мощность, ток, частота вращения, к.п.д., для машин переменного тока — коэффициент мощности, при необходимости данные системы возбуждения, иногда расчетный режим работы.

Возможные области применения тех или иных типов электрических машин, помимо соответствия требованиям приводного механизма по номинальным данным, определяются их рабочими характеристиками и экономическими показателями.

3.5. КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Современная конструкция машины постоянного тока представлена на рис. 3. 12. Основными ее элементами являются магнитная система и рабочая обмотка. Рассмотрим конструктивное выполнение этих элементов.

Основная задача конструктора при разработке магнитной системы заключается в том, чтобы при минимальном расходе материалов и минимальной мощности системы возбуждения создать в машине возможно больший магнитный поток. Согласно закону Ома для магнитной цепи для повышения магнитного потока при той же намагничивающей силе магнита необходимо уменьшить магнитное сопротивление основной магнитной цепи, по которой проходит рабочий магнитный поток. Уменьшить магнитное сопротивление можно либо увеличив габариты машины, либо повысив магнитную проницаемость участков магнитной цепи. С этой целью во всех машинах используется замкнутая магнитная система с минималь-

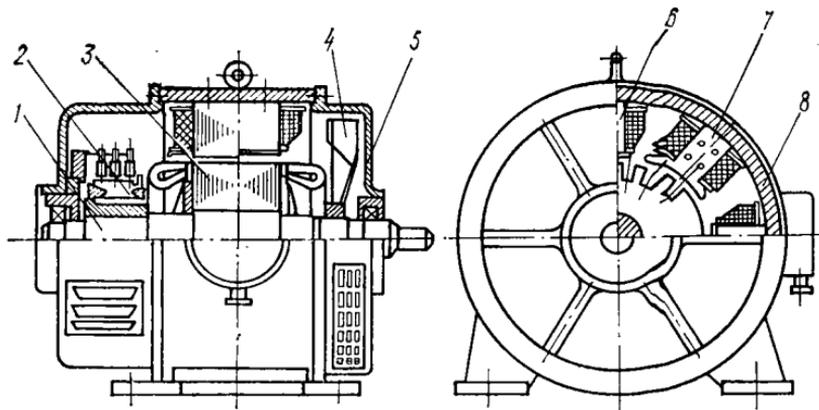


Рис. 3.12. Машина постоянного тока:

1 — вал; 2 — коллектор; 3 — якорь; 4 — вентилятор; 5 — подшипниковый щит; 6 — добавочный полюс; 8 — станина.

ными допустимыми, по условиям работы, воздушными зазорами. Магнитная система машины постоянного тока представлена на рис. 3. 13.

Рассмотрим, как выполнены отдельные участки магнитной цепи. Наружный участок магнитной цепи 1, замыкающий магнитные полюса, называется ярмом. Ярмо используется не только как магнитопровод, но и как элемент механической конструкции, к которому крепятся все остальные элементы. Ярмо иногда называют станиной. Оно должно иметь достаточную механическую прочность, и обычно выполняется из конструкционной стали достаточно большого сечения. По ярму проходит постоянный магнитный поток, магнитная индукция в нем невелика из-за большого сечения.

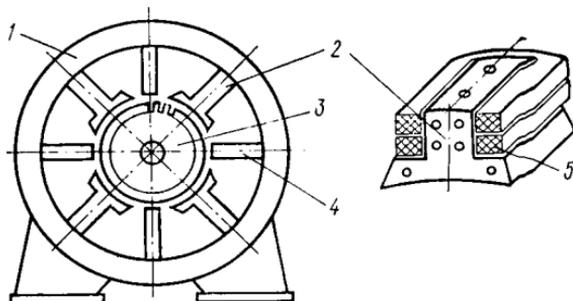


Рис. 3.13. Магнитная система машины постоянного тока:

1 — ярмо (станина); 2 — сердечник главного полюса; 3 — сердечник якоря; 4 — сердечник добавочного полюса; 5 — обмотка возбуждения.

К ярму крепятся сердечники полюсов. Для возбуждения электрических машин обычно применяют электромагниты (постоянные магниты используют в основном в микромашинах). Сердечники 2 главных полюсов выполняют из листовой стали (листы толщиной 0,5...0,35 мм) с повышенной магнитной проницаемостью. На сердечнике расположена обмотка 5 электромагнита (обмотка возбуждения), создающая магнитный поток. На вращающейся части (роторе) находится рабочая обмотка. Ротор обычно называется якорем. Особенностью якоря по сравнению с остальными участками магнитной цепи является то, что он вращается в магнитном поле, т.е. материал якоря подвергается перемагничиванию. Для уменьшения потерь в теле якоря, вызванных перемагничиванием, его сердечник набирают из отдельных изолированных листов электротехнической стали, имеющей не только высокую магнитную проницаемость, но и пониженные потери при перемагничивании.

Воздушный зазор между статором и ротором мал по величине, однако оказывает существенное влияние на магнитные и рабочие характеристики электрической машины. Магнитная проницаемость воздуха в десятки тысяч раз меньше магнитной проницаемости стали, из которой выполнены остальные участки магнитной цепи. Поэтому величина воздушного зазора во многом определяет мощность системы возбуждения.

В современных машинах постоянного тока помимо главных полюсов имеются добавочные полюса 4, которые служат для улучшения работы щеточного контакта и практически не влияют на рабочие характеристики машины.

На цилиндрической поверхности сердечника якоря выштампованы пазы, в которые укладывается рабочая обмотка. Она состоит из отдельных катушек (секций), стороны которых уложены в пазы. Секции соединяются по определенной схеме. При укладке секций в пазы их изолируют от стенок паза специальной изоляцией, которая обычно выполняется из пленкокартона, несмотря на то что каждый виток обмотки имеет собственную изоляцию — эмалевую или волокнистую.

В проводниках рабочей обмотки машины постоянного тока при движении под полюсами чередующейся полярности наводятся переменные э.д.с. и протекает переменный ток. В то же время во внешней цепи напряжение и

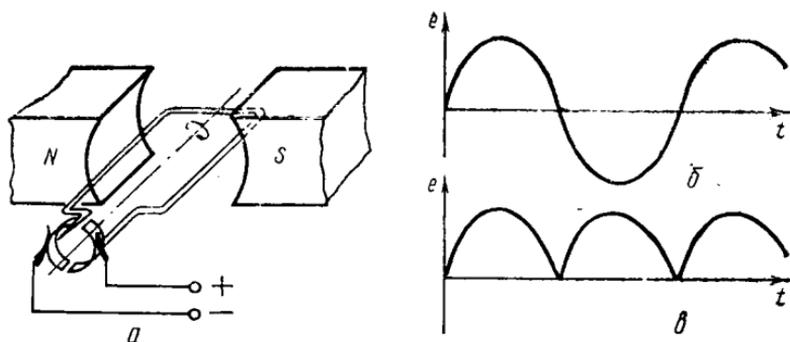


Рис. 3.14. Простейший коллектор:

a — устройство; *б* — кривая изменения э. д. с., наводимой в витке при вращении; *в* — кривая изменения э. д. с. в рабочей цепи (на щетках).

ток постоянные, поэтому необходим преобразователь, включенный между внешней цепью и якорной обмоткой. Роль такого преобразователя выполняют коллектор и скользящие по нему контакты (щетki). Коллектор со щетками представляет собой многопозиционный переключатель, аналогичный по своему действию простейшему двухпозиционному переключателю (рис. 3.14, *a*). Он состоит из двух изолированных медных дуг, по которым скользят неподвижные контакты. К коллекторным пластинам подключены концы рабочей секции или катушки.

В реальных машинах число коллекторных пластин значительно больше двух. Сами коллекторные пластины представляют собой изолированные медные сегменты, скрепленные металлической конструкцией или пластмассой. Концы секций подсоединяются к коллекторным пластинам в определенном порядке, что обеспечивает создание необходимой схемы обмотки. Токосъем с коллектора выполняется угольно-графитными скользящими контактами (щетками), прижимаемыми к коллектору специальными нажимными пружинами. Сердечник якоря и коллектор закреплены на валу, вращающемся в подшипниках. Подшипники обычно встроены в боковые крышки (щиты).

Охлаждение активных частей, в которых выделяется теплота, осуществляется системой вентиляции. Для этой цели на валу машины устанавливается вентилятор. Поток охлаждающего воздуха, обтекая нагретые части, обеспечивает интенсивное охлаждение машины. Для увеличения поверхности охлаждения в машинах большой мощности делают специальные охлаждающие каналы в

сердечниках и обмотках, формируют охлаждающий поток, устанавливая внешние вентиляторы.

Конструкция электрической машины, обеспечивающая высокую эффективность и надежность, отработывалась в течение десятилетий. Основные достижения в последних конструкциях связаны с применением новых, более высококачественных материалов и улучшением методов охлаждения машин. В связи с развитием полупроводниковой техники в последнее время появляются бесщеточные машины постоянного тока, у которых скользящий контакт заменяют управляемым полупроводниковым преобразователем.

3.6. СОВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Электротехническая промышленность выпускает сотни типов машин как общего, так и специального назначения.

Значительное место в программе электромашиностроения занимают машины постоянного тока. Основная область применения электрических машин постоянного тока — электроприводы с перегрузками частыми пусками, реверсами, а также с плавным регулированием скорости в широком диапазоне. Для питания таких электроприводов и ряда технологических установок необходимы генераторы постоянного тока. Основные характеристики машин постоянного тока определяются их конструктивными особенностями и схемой включения системы возбуждения.

Принципиальные схемы электрических машин постоянного тока с разными видами возбуждения представлены на рис. 3.15. Обмотка возбуждения может подключаться к постороннему источнику электрической энергии (независимое возбуждение) или к рабочей цепи (самовозбуждение). В генераторах постоянного тока при самовозбуждении цепь возбуждения обычно включена параллельно нагрузке на зажимы якоря. В двигателях обмотка возбуждения может подключаться к якорной цепи параллельно либо последовательно. Иногда применяют и смешанное включение, т.е. одну обмотку включают параллельно, а другую — последовательно.

На практике преимущественно применяют генераторы с независимым возбуждением или самовозбуждением,

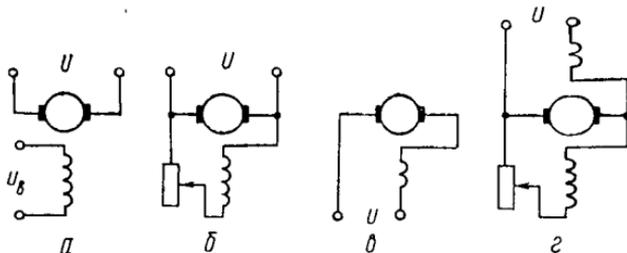


Рис. 3.15. Электрические схемы машин постоянного тока с различными типами возбуждения:
a — независимым; *б* — параллельным; *в* — последовательным; *г* — смешанным.

магнитный поток которых мало меняется. В этом случае внешние характеристики генераторов постоянного тока описываются выражением, аналогичным полученному в п. 3.4.

Напряжение генератора

$$u = E - IR_{я},$$

где $E = c_e \Phi n$ — э.д.с., наводимая в якорной обмотке (на щетках); $R_{я}$ — сопротивление якорной цепи; I — ток нагрузки; Φ — рабочий поток машины; n — частота вращения; c_e — конструктивный коэффициент, постоянный для данной машины.

Так как сопротивление якорной цепи относительно мало, то при изменении тока нагрузки напряжение меняется мало, внешняя характеристика $u = f(I)$ «жесткая» (рис. 3.16).

Напряжение таких генераторов легко регулировать, изменяя ток возбуждения и, следовательно, магнитный поток Φ .

Механические характеристики двигателей постоянного тока также описываются уравнениями, аналогичными полученным в п.3.4..

Частота вращения электродвигателя

$$n = \frac{u - IR_{я}}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_{я}}{c_e^2 \Phi^2} M,$$

где M — электромагнитный вращающий момент, соответствующий моменту нагрузки на валу двигателя.

При независимом и параллельном возбуждении магнитный поток слабо зависит от нагрузки и при измене-

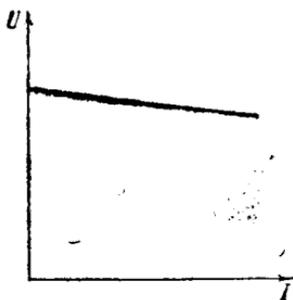


Рис. 3.16. Внешняя характеристика генератора постоянного тока с независимым возбуждением.

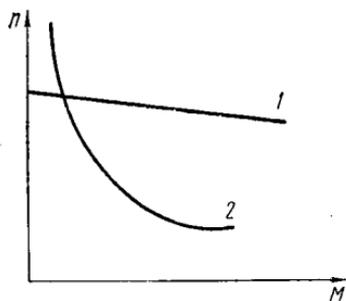


Рис. 3.17. Механические характеристики двигателя постоянного тока:

1 — с параллельным возбуждением; 2 — с последовательным.

нии на грузки скорость меняется мало (характеристика 1 на рис. 3.17). Механическая характеристика $n=f(M)$ является «жесткой». При последовательном возбуждении ток якоря является током возбуждения и магнитный поток меняется с изменением нагрузки. В результате при росте нагрузки скорость двигателя резко падает (характеристика 2). Такая характеристика называется «мягкой».

Важным свойством электрических двигателей постоянного тока является возможность плавного регулирования частоты вращения в широких пределах. Как видно из приведенного выражения, частоту вращения можно регулировать путем изменения питающего напряжения, величины магнитного потока (тока возбуждения) и сопротивления якорной цепи. Все эти методы находят применение в практике электропривода и будут рассмотрены в гл. 4.

Кроме того, двигатели постоянного тока обеспечивают высокий пусковой момент и снабжены простой пускорегулирующей аппаратурой, что важно при их применении во многих областях техники.

В настоящее время выпускаются машины постоянного тока мощностью от долей ватта до десятков тысяч киловатт. Номинальные частоты вращения двигателей лежат в пределах от десятков оборотов в минуту до десяти — пятнадцати тысяч.

В зависимости от мощности, частоты вращения, требований эксплуатации меняется и конструктивное выпол-

нение машин. Наибольшим разнообразием отличаются микромашины, применяемые в системах автоматики и маломощных автономных установках. Конструкция некоторых типов микромашин постоянного тока может существенно отличаться от типовой, рассмотренной в предыдущем параграфе.

Для снижения габаритов и потерь в микромашинах широко используют возбуждение с помощью постоянных магнитов, так называемые магнитоэлектрические машины. Таким образом, на новом уровне используется старое конструктивное решение, от которого отказались в прошлом, так как качество постоянных магнитов было низким. Если в первых магнитоэлектрических машинах применялись магниты из углеродистой стали с низкими магнитными свойствами, нестабильные, то в настоящее время созданы новые магнитные материалы для постоянных магнитов, которые по магнитным и весовым показателям могут конкурировать с электромагнитами. Это сплавы типа ЮНДК, содержащие алюминий, никель, кобальт, титан, железо, медь и иногда другие присадки. Подобные магнитные материалы могут обеспечить максимальную остаточную индукцию $B_r \approx (1 \dots 1,2) \text{ Тл}$, размагничивающая напряженность магнитного поля для них составляет (800—600) А/см.

Указанные магнитные материалы имеют и ряд недостатков: высокую стоимость и сложный процесс их изготовления. Следовательно, весьма перспективными являются разработки материалов иного типа — прессованных, на керамической и полимерной основе. Применение подобных материалов не только позволяет существенно упростить технологию, но и создать новые типы электро-механических устройств, например, с гибкими магнитами.

Некоторые специальные типы микродвигателей с постоянными магнитами являются наиболее быстродействующими исполнительными двигателями для систем автоматики. Быстрая обработка получаемых управляющих сигналов повышает быстродействие и эффективность всей системы автоматики. В области микромашиностроения можно встретить оригинальные конструкции, существенно отличающиеся от нормальных форм. Достаточно перечислить только основные виды якорей подобных машин — полый беспазовый якорь с печатной обмоткой.

Показательно, что некоторые решения, впервые использованные для микромашин, затем нашли применение в машинах средней и большой мощности. Беспазовые якоря, обмотка которых не уложена в пазах, а равномерно размещена на цилиндрической поверхности сердечника, скреплена клеем и пластмассовыми клиньями, рассматриваются как конструктивные варианты для машин мощностью в тысячи киловатт. Особый интерес представляют машины с печатной обмоткой, нанесенной на цилиндрический или дисковый якорь.

Применение технологии, разработанной для изготовления печатных схем в радиоэлектронике, позволяет полностью механизировать и автоматизировать процесс производства и обеспечить значительную экономию материала (обмоточной меди).

Создание мощных электромагнитов со сверхпроводящей обмоткой стимулировало работы по их применению в электрических машинах. Здесь ярко проявилась спираль развития — первые мощные машины со сверхпроводящими магнитами выполнены по схеме униполярной машины, аналогичной «диску Фарадея», одного из первых электромеханических генераторов. В настоящее время созданы униполярные двигатели мощностью до 5000 кВт. В процессе эксплуатации эти машины оказались достаточно экономичными и надежными.

3.7. КОНСТРУКЦИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

Особое место занимают синхронные машины. С помощью синхронных генераторов вырабатывается практически вся электроэнергия. На гидравлических, тепловых и атомных электростанциях первичная механическая энергия турбин преобразуется в электрическую в синхронных гидро- и турбогенераторах. В связи с развитием энергетики совершенствуется конструкция синхронных генераторов — растет их единичная мощность. В нашей стране созданы турбогенераторы мощностью 800 тыс. кВт, осваивается генератор мощностью 1200 тыс. кВт, рассматривается возможность создания машин мощностью 2... 2,5 млн. кВт. Единичная мощность гидрогенераторов достигает 600 тыс. кВт. По тому же принципу работают самые маломощные миниатюрные синхронные электродвигатели, мощность которых составляет тысячные доли ватта.

В большинстве синхронных машин используется обратная конструктивная схема по сравнению с машинами постоянного тока, т. е. система возбуждения расположена на роторе, а якорная обмотка на статоре. Это объясняется тем, что через скользящие контакты проще осуществить подвод сравнительно слабого тока к обмотке возбуждения, чем тока к рабочей обмотке.

Магнитная система синхронной машины показана на рис. 3.18. Полюса возбуждения 1 размещены на роторе. Сердечники полюсов электромагнитов выполняются так же, как в машинах постоянного тока. На неподвижной части — статоре расположен сердечник 2, набранный из изолированных листов электротехнической стали, в пазах которого размещена рабочая обмотка переменного тока — обычно трехфазная.

При вращении ротора в обмотке якоря наводится переменная э.д.с., частота которой прямо пропорциональна частоте вращения ротора

$$f = pn,$$

где p — число пар полюсов; n — частота вращения, об/с.

Протекающий по рабочей обмотке переменный ток создает свое магнитное поле. Ротор и поле рабочей обмотки вращаются с одинаковой частотой — синхронно. В двигательном режиме вращающееся рабочее поле увлекает за собой магниты системы возбуждения, а в генераторном — наоборот. Из этого следует основное свойство синхронных машин — постоянство частоты вращения при постоянстве частоты питающей сети.

Синхронные машины обычно работают при постоянной частоте $f = 50$ Гц. Частота вращения в двигательном режиме также остается постоянной, $n = \frac{f}{p}$ об/с. Таким образом, механическая характеристика синхронного двигателя абсолютно жесткая — при изменении нагрузки скорость остается постоянной. Электромагнитный момент зависит от взаимодействия вращающегося поля статора и полюсов рото-

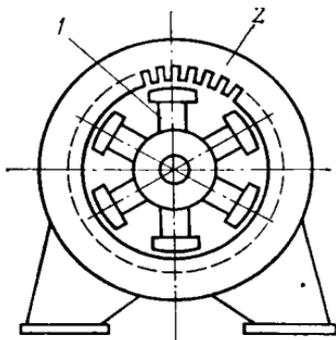


Рис. 3.18. Магнитная система синхронной машины.

ра. С увеличением момента увеличивается угол между осями полюсов ротора и результирующего магнитного потока. При больших нагрузках, в 2,0 ... 2,5 раза превышающих номинальную, синхронная связь может нарушиться. Силы магнитного сцепления оказываются меньше сил нагрузки, скорость ротора отличается от синхронной. Как говорят, машина «выпадает из синхронизма», «теряет устойчивость». Это аварийный режим, машину приходится отключать.

Внешняя характеристика синхронного генератора (рис. 3.19) существенно зависит от характера нагрузки. При активно-индуктивной нагрузке напряжение генератора падает быстрее, чем при чисто активной, а при емкостной может даже расти с ростом нагрузки.

Такой характер внешних характеристик определяется тем, что внутреннее сопротивление генератора является, в основном, индуктивным.

Мощные синхронные генераторы почти никогда не работают как одиночные. Как правило, они связаны общей энергосистемой большой мощности. При работе синхронной машины (двигателя или генератора) совместно с системой большой мощности существенное влияние на рабочий режим оказывает изменение тока возбуждения. В синхронном режиме частота вращения машины и напряжение не изменяются, так как они задаются мощной сетью. Изменение тока возбуждения приводит к изменению реактивного тока машины (рис. 3.20). При уменьшении тока возбуждения синхрон-

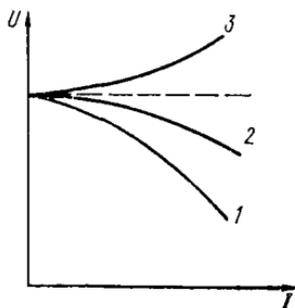


Рис. 3.19. Внешние характеристики синхронного генератора при работе на:

1 — активно-индуктивную нагрузку; 2 — активную нагрузку; 3 — активно-емкостную нагрузку.

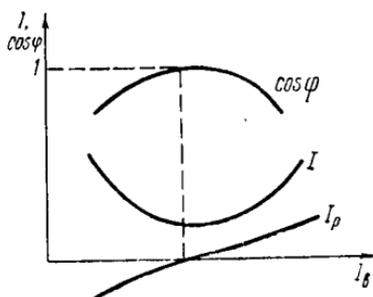


Рис. 3.20. Зависимость реактивного тока I_p , полного тока I и коэффициента мощности $\cos \varphi$ синхронной машины от тока возбуждения при параллельной работе с сетью.

ная машина потребляет реактивный (намагничивающий) ток из сети. При увеличении тока возбуждения она отдает в сеть реактивную мощность. Способность синхронных машин отдавать в сеть реактивную мощность является очень важной для эксплуатации. Все остальные типы машин переменного тока потребляют реактивную мощность из сети, т. е. нагружают линии электропередачи и все элементы энергосистем реактивным током. Это приводит к повышению потерь в системе, добавочному расходу проводниковых материалов. Применение синхронных двигателей позволяет разгрузить систему от реактивных токов, повысить коэффициент мощности ($\cos \varphi$) нагрузки.

Рассмотрим конструкцию самых мощных машин — турбо- и гидрогенераторов.

Турбогенераторы приводятся во вращение паровыми турбинами, которые наиболее экономичны при высоких частотах вращения. Поэтому турбогенераторы выполняются с минимальным числом полюсов системы возбуждения — двумя, что соответствует максимальной частоте вращения 3000 об/мин при промышленной частоте 50 Гц. Основная проблема турбогенераторостроения заключается в создании надежной машины при предельных величинах электрических, магнитных, механических и тепловых нагрузок. Эти требования накладывают отпечаток на всю конструкцию машины (рис. 3.21). Ротор турбогенератора выполняется в виде цельной поковки диаметром до 1,25 м, длиной до 7 м (рабочая часть). Полная длина поковки с учетом вала составляет 12 ... 15 м. На рабочей части фрезеруются пазы, в которые укладывается обмотка возбуждения. Таким образом получается двухполюсный электромагнит цилиндрической формы без явно выраженных полюсов.

При производстве турбогенераторов применяются новейшие материалы и конструктивные решения, в частности непосредственное охлаждение активных частей струями охлаждающего агента — водорода или жидкости. Для получения больших мощностей приходится увеличивать длину машины, что и придает ей весьма своеобразный вид.

Гидрогенераторы (рис. 3.22) по конструкции существенно отличаются от турбогенераторов. Экономичность режима гидравлических турбин зависит от скорости водного потока, т. е. напора. На равнинных реках создать

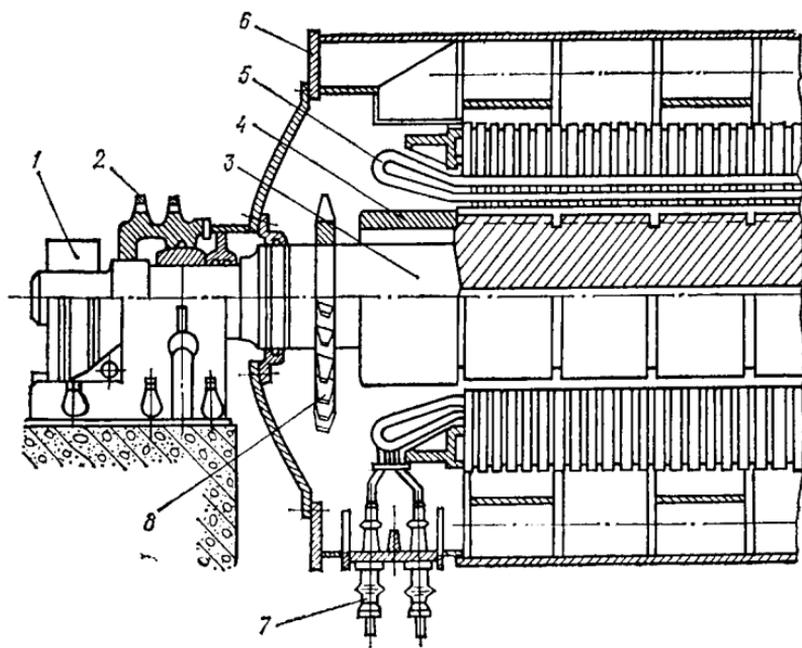


Рис. 3.21. Общий вид турбогенератора:

1 — контактные кольца и щеточный аппарат; 2 — подшипник; 3 — ротор; 4 — бандаж ротора; 5 — обмотка статора; 6 — статор; 7 — выводы обмотки статора; 8 — вентилятор.

большой напор невозможно, поэтому частоты вращения турбин весьма низкие — от десятков до сотен оборотов в минуту. Чтобы получить промышленную частоту 50 Гц, такие тихоходные машины приходится делать с большим числом полюсов. В общем случае количество полюсов

$$2p = \frac{2f}{n}, \text{ при } f = 50 \text{ Гц } 2p = \frac{100}{n},$$

где n — частота вращения, об/с.

Для размещения большого количества полюсов приходится увеличивать диаметр ротора гидрогенератора, иногда до 10 ... 11 м.

Создание мощных турбо- и гидрогенераторов представляет сложную инженерную задачу. Необходимо решить целый ряд вопросов механического, электромагнитного, теплового и вентиляционного расчетов и обеспечить технологичность конструкции в производстве.

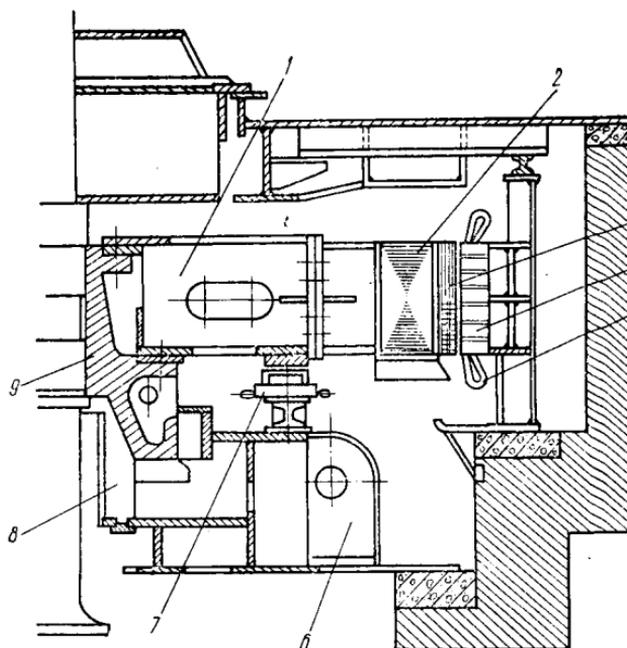


Рис. 3.22. Продольный разрез гидрогенератора зонтитчного
 1 — ступица ротора; 2 — обод ротора; 3 — полюс ротора; 4 — статор; 5 — обмотка статора; 6 — крестовина; 7 — тормоз; 8 — втулка ротора.

Эти задачи по плечу только мощным конструкторским производственным коллективам и фирмам. У нас не имеется ряд центров производства подобных машин. Старейшее и известнейшее объединение «Электротяжмаш» в Ленинграде, «Электротяжмаш» в г. Харькове, «Электротяжмаш» в Свердловске и Новосибирск — это Богенераторный завод.

Весьма интересны конструкции различных синхронных микромашин, в которых широко применяются системы с постоянными магнитами и реактивные системы, т. е. системы, у которых рабочее магнитное поле взаимодействует не с магнитным полем возбудителя, а с ферромагнитными выступающими полюсами ротора, не имеющими обмотки. Но все-таки основными конструкциями техники, где синхронные машины сегодня не имеют конкурентов — это энергетика. Все генераторы на станциях от самых мощных до передвижных выстроены на базе синхронных машин. Что же касается

ных двигателей, то их слабым местом является проблема пуска. Сам по себе синхронный двигатель обычно не может разогнаться. Для этого он снабжается специальной пусковой обмоткой, работающей по принципу асинхронной машины, что усложняет конструкцию и сам процесс пуска. Поэтому синхронные двигатели обычно выпускаются на средние и большие мощности.

3.8. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Асинхронные трехфазные двигатели — наиболее распространенный вид электрических машин. Их основное достоинство — простота и надежность. Само название асинхронный, т. е. несинхронный, говорит о том, что частота вращения такого двигателя отличается от синхронной и может меняться с изменением нагрузки. Это связано с самим принципом работы асинхронных двигателей, которые иногда называют индукционными.

Конструкция асинхронного двигателя, предложенная М. О. Доливо-Добровольским, практически сохранилась и до наших дней (рис. 3.23). На статоре, в пазах цилиндрического пакета, набранного из изолированных листов электротехнической стали, размещена многофазная (обычно трехфазная) обмотка. При протекании по ней переменного тока создается вращающееся магнитное поле. На роторе, через который замыкаются силовые линии магнитного поля, имеется короткозамкнутая обмотка типа беличьей клетки, либо трехфазная. В роторной обмотке при движении поля относительно ее про-

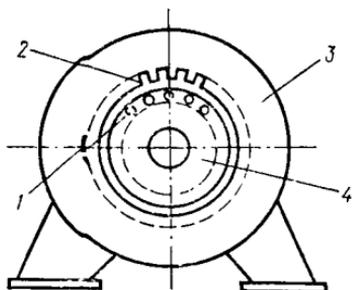


Рис. 3.23. Устройство асинхронной машины:

1 — стержни короткозамкнутой обмотки; 2 — пазы с обмоткой; 3 — сердечник статора; 4 — сердечник ротора.

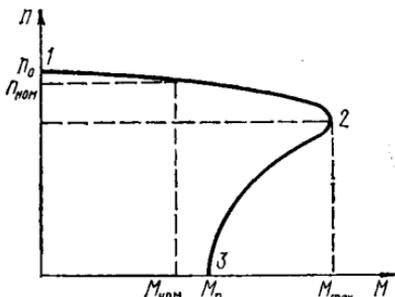


Рис. 3.24. Механическая характеристика асинхронного двигателя.

водников наводятся (индуцируются) э.д.с. и проток, взаимодействующие с магнитным полем. В результате действия электромагнитных сил ротор вращается в том же направлении, что и поле. Очевидно, что величина э.д.с., наводимых в роторе, зависят от скорости вращения поля по отношению к ротору, т. е. от того, насколько ротор отстает от поля. Отставание по отношению к вращению, выраженное в относительных единицах, называют скольжением. Асинхронные двигатели вращаются с частотой ниже синхронной, так как при приближении к ней, когда скольжение стремится к нулю, величина наведенных э.д.с. и токов уменьшаются, а электромагнитные силы взаимодействия. При синхронной частоте вращения ротора э.д.с. частоте вращения поля n_0 , они равны нулю. На практике, что движущую электромагнитную силу создают только активные составляющие токов в роторе. В это время по роторной обмотке протекает переменный ток, следовательно, полное сопротивление определяется как активным сопротивлением, так и индуктивным.

При работе с большим скольжением, например при пуске, индуктивное сопротивление значительно превышает активное и поэтому активная составляющая момента невелика. В результате электромагнитная сила и электромагнитный вращающий момент при больших скольжениях уменьшаются и механическая характеристика двигателя имеет форму, показанную на рис. 3.24. В этот момент M_n может быть значительно меньше максимального момента M_{max} . Поэтому в паспортных данных асинхронного двигателя указывают кратность пускового момента по отношению к номинальному моменту $M_{ном}$ и кратность пускового тока. Пусковой ток может в шесть-семь раз превышать номинальный, поэтому необходимо учитывать при выборе и настройке двигателя питающей сети.

Асинхронные двигатели различаются по конструкции ротора. Наиболее распространены двигатели с короткозамкнутым ротором. В них проводящие контуры замыкаются в самом теле ротора, выполнено из проводящего материала (так называемые магнитопроводные роторы) или короткозамкнутых контурах, расположенных в пазах ротора (роторы с беличьей клеткой). Зависимость от геометрии активных стержней ротора: роторы с нормальной клеткой, с двойной беличьей

кой, глубокопазные и т. п. При изменении конструкции и сечения клетки меняются рабочие характеристики двигателя и его свойства. Двигатели с беличьей клеткой получили наибольшее распространение для приводов мощностью 0,1 ... 10 кВт, хотя асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором выполняют и в более широком диапазоне мощностей (до нескольких тысяч киловатт в единице).

В установках с повышенными требованиями к эксплуатационным характеристикам двигателей применяют асинхронные двигатели с фазным ротором. В пазах ротора уложена многофазная обмотка, выводы которой подсоединены к кольцам. Через скользящие контакты (щетki) к роторной обмотке могут быть подсоединены добавочные сопротивления или подведено питание от внешней цепи (машины двойного питания). Изменяя параметры роторной обмотки, можно влиять на рабочие характеристики двигателя в процессе эксплуатации — изменять величину пускового момента, пускового тока, регулировать скорость.

К.п.д. асинхронных двигателей достаточно высок — в малых машинах достигает 0,8 ... 0,85 и повышается с ростом мощности. Основные недостатки асинхронных двигателей — сложность регулирования частоты вращения и сравнительно низкий коэффициент мощности.

3.9. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, преобразующее электрическую энергию переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте.

Хотя трансформатор представляет собой статическое устройство, тем не менее основные электромагнитные процессы протекают в нем так же, как и в электрических машинах. Особенно близки по своей природе трансформатор и асинхронная машина. Системы уравнений, описывающих электромагнитные процессы в трансформаторах и асинхронных машинах, идентичны. Поэтому трансформаторы обычно рассматриваются в курсе электрических машин.

Если первые трансформаторы использовались для «дробления» электрической энергии, более удобного пи-

тания отдельных потребителей, то с течением времени основная задача трансформаторов в энергетических системах состоит в обеспечении на различных линиях электропередач и распределительных сетях высокого напряжения. При этом обеспечивается передача энергии с минимальными затратами. Электрическая энергия, вырабатываемая на электростанциях, передается к потребителям проходит четыре-пять трансформаций. Трансформаторы с регулируемым напряжением под нагрузкой обеспечивают высокое качество подводимой потребителю электрической энергии: стабильность напряжения и бесперебойное снабжение электрической энергией.

Современные трансформаторы имеют сложную конструкцию, их единичная мощность достигает 1200 МВА. К. п. д. очень высок — до 99,8%. Общий вид трансформатора представлен на рис. 3. 25.

Основным узлом трансформатора, в котором

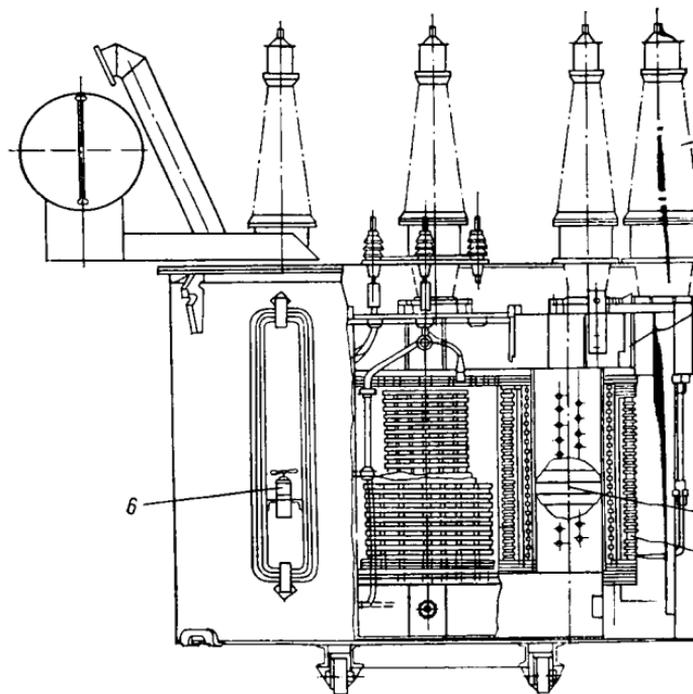


Рис. 3.25. Общий вид трансформатора:

1 — проходной изолятор; 2 — выемная часть; 3 — бак; 4 — магнитопровод;
5 — обмотка; 6 — вентилятор.

электромагнитных связей происходит передача и преобразование энергии, является активная (в трансформаторах ее еще называют — выемная) часть 2. На замкнутом магнитопроводе 4, набранном из изолированных листов электротехнической стали, расположены цилиндрические обмотки 5. Они связаны между собой общим магнитным потоком (потоком взаимоиндукции). Для улучшения отвода теплоты обмотки и сердечники погружены в бак 3 с трансформаторным маслом, что одновременно улучшает и изоляцию.

Для улучшения теплоотдачи в окружающую среду наружная поверхность бака снабжается специальными охладителями — радиаторами, устанавливаемыми по его периметру, что позволяет значительно увеличить поверхность охлаждения. В самых мощных трансформаторах и этого оказывается недостаточно, поэтому в систему охлаждения вставляют насосы, обеспечивающие более интенсивную циркуляцию масла. Для охлаждения радиаторов устанавливают вентиляторы (дутьевое охлаждение) или их охлаждают водой. В высоковольтных конструкциях особое место занимают проходные изоляторы 1, устанавливаемые на крышке бака. Через них осуществляется электрическая связь обмоток с соответствующими электрическими системами. При высоких напряжениях 380, 500 и 750 тыс. вольт габариты этих изоляторов соизмеримы с габаритами самого трансформатора.

Развитие трансформаторостроения осуществляется наряду с развитием электроэнергетики все возрастающими темпами. Ведущими предприятиями в области трансформаторостроения являются Московский трансформаторный завод им. В. М. Куйбышева, Запорожский трансформаторный завод, которые специализируются на производстве мощных трансформаторов.

3.10. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МАШИНЫ

По мимо указанных основных типов электрических машин в промышленности и быту широко применяются специальные машины. Например, в маломощных бытовых установках используются коллекторные двигатели переменного тока. По ряду характеристик они близки к двигателям постоянного тока с последовательным возбуждением, хотя имеют отличительные особенности. В связи

с развитием бытовой техники в настоящее время выпускаются в большом количестве.

В системах автоматики применяются специ-
альные типы электрических машин, например, шаговые
двигатели, отличающиеся тем, что в них осуществляют
непрерывное, а дискретное перемещение ротора
и статора. Шаговые двигатели, в которых осуществляется не
а линейное перемещение движущейся части, что по-
зволяет существенно упростить кинематическую схему
приводов.

В некоторых счетных и моделирующих устройствах
используются специальные электрические машины, использую-
щие преобразования подаваемых на них сигналов, позволяю-
щих в «удобную» для системы управления форму преобразовать
электрических сигналов. Эти функции выполняют тахогенераторы
разных типов, дающие сигнал, пропорциональный частоте
вращения; электромеханические датчики частоты вращения;
датчики угла поворота. Особенно широкое распространение
получили последние, так как с помощью их можно бесконтактно
с большой точностью измерять и сравнивать по величине углы
поворота и линейные перемещения. Для этих целей используют
электрические машины разных типов — сельсины, потенциометры,
трансформаторы, индуктосины и т. д.

Особое место в системах автоматики занимают электро-
машинные усилители (ЭМУ), обеспечивающие многократное
усиление слабых электрических сигналов. В лучших образцах
ЭМУ коэффициент усиления по мощности достигает нескольких
десятков тысяч.

3.11. РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЯ В СССР

Несмотря на то что работы русских ученых внесли
большой вклад в развитие электротехники, до сих пор
доля России в развитии электротехнической промышленности
развита очень слабо. Отдельные электромеханические
заводы принадлежали заграничным фирмам и выпускали
ли машины по проектам и документации, разработанным
за границей. После Великой Октябрьской социалистической
революции и принятия плана ГОЭЛРО государство уделило
большое внимание развитию электротехнической промышлен-
ности, как материальной базы электрификации страны. В
первые годы были созданы три крупных завода: «Электросила» в Ленинграде

намо» в Москве и в Харькове электромеханический завод (ХЭМЗ).

Заводы были реконструированы, стали пополняться новыми кадрами советских рабочих и специалистов.

Уже в 1924 г. был выпущен первый отечественный турбогенератор мощностью 500 кВт. Первые гидрогенераторы для Волховской ГЭС были изготовлены в 1926 г. и имели мощность 7000 кВт. Тогда же началось производство электрических машин различных типов для нужд народного хозяйства.

Советские электромашиностроители за годы первых трех пятилеток провели колоссальную работу по организации производства, разработке и усовершенствованию технологии и конструкции электрических машин разных типов, унификации конструкций. Советскими учеными и инженерами были разработаны теория и практика проектирования и технология производства электрических машин. В результате уже в 1937 г. завод «Электросила» выпустил турбогенератор мощностью 100 тыс. кВт с частотой вращения 3000 об/мин, самый мощный в мире в то время. В 1938 г. был выпущен самый крупный в мире гидрогенератор мощностью 68750 кВт·А и частотой вращения 62,5 об/мин для Рыбинской гидроэлектростанции. Таким образом, в период, предшествовавший Великой Отечественной войне, советские электромашиностроители вышли на передний край технического прогресса.

Война нанесла огромный ущерб всему народному хозяйству нашей страны. Поэтому в четвертой, послевоенной пятилетке перед электропромышленностью стояла задача в кратчайшие сроки обеспечить необходимыми машинами и оборудованием восстанавливаемые и строящиеся промышленные предприятия, электростанции, электрифицированный транспорт. В то же время начали быстро развиваться системы электроавтоматики, требующие большого количества специальных микромашин. В стране бурными темпами развивалась электрификация сельского хозяйства и быта. Все это повысило требования к продукции электромашиностроения в количественном и качественном отношениях, а также по номенклатуре изделий.

В годы пятой пятилетки началось практическое использование более качественных сортов электротехнической стали, синтетических изоляционных материалов, что

создало предпосылки для разработки более совершенных серий электрических машин и трансформаторов. При создании новых машин учитывались современные достижения в области конструкции электрических машин, методов охлаждения, современных материалов.

В дальнейшем шло систематическое совершенствование выпускаемых машин, повышение их качества, увеличение предельной мощности. Существенный шаг сделан в области интеграции производства машин в СЭВ. Страны — члены СЭВ не только совместно разрабатывают и выпускают электрические машины различных серий, но и специализируются на производстве отдельных типов электрооборудования для всех стран-членов СЭВ.

В настоящее время отечественное электромашиностроение является одной из ведущих отраслей промышленности. Ее продукция экспортируется во многие развивающиеся и капиталистические страны. В качестве иллюстрации достижений электромашиностроения можно отметить создание турбогенератора для электростанций мощностью 1200 МВт; турбогенераторов для атомных электростанций мощностью 1000 МВт, гидрогенераторов мощностью 640 МВт Саяно-Шушенской гидроэлектростанции, трансформаторов и автотрансформаторов для линий электропередачи напряжением 750 кВ, мощностью до 1200 МВ·А и т. д.

Значительное внимание уделяется и технической реконструкции предприятий. Широкая автоматизация технологических процессов, создание более совершенных активных и конструктивных материалов, разработка и освоение новых конструкций — все это должно обеспечить выполнение решений партии и правительства о опережающем росте выпуска электротехнического оборудования.

Глава 4

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

4.1. КРАТКИЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЗВИТИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В плане ГОЭЛРО Ленин сделал запись о том, что электрический привод наиболее надежно обеспечивает любую быстроходность и автоматическую

механических операций на самом обширном поле труда. Из этого высказывания В. И. Ленина следует, что электропривод является основой электрификации и автоматизации рабочих машин и технологических процессов во всех отраслях народного хозяйства. Значение электроприводов в жизни и деятельности современного общества трудно переоценить, поскольку он оказывает существенное влияние на темпы социального и технического прогресса.

Электропривод представляет совокупность средств для преобразования электрической энергии в механическую, включая передаточные устройства, устройства управления и автоматизации.

История разработки и создания первого электропривода связана с работами русского ученого академика Б. С. Якоби. В 1838 г. Б. С. Якоби установил изобретенный им электродвигатель на лодке и, соединив вал электродвигателя с гребным винтом, создал первый в истории электроход. Он двигался по Неве в районе Петербурга, как по течению, так и против него, развивая скорость до 5 км/ч с 12 пассажирами на борту. Источником питания электродвигателя являлась батарея сухих элементов.

Электродвигатели для привода гребных винтов на судах широко используются и в настоящее время. Советские ледоколы «Ленин», «Арктика» и «Сибирь» являются мощными электроходами с атомными паротурбинными установками. Однако электропривод, созданный Б. С. Якоби, в то время не получил распространения, что было обусловлено высокой стоимостью и малой емкостью применявшихся сухих батарей. Дальнейшее развитие электропривода было связано с появлением электрических генераторов необходимой мощности.

Известный русский электротехник В. Н. Чиколев, основавший в 1880 г. журнал «Электричество», продолжал работы по электроприводу. В 1882 г. им был разработан электропривод швейной машины, а в 1886 г. — электропривод электровентилятора. Оба электропривода были удостоены золотых медалей на Всероссийских выставках.

На протяжении 1890—1894 гг. электропривод впервые был применен на боевых кораблях Русского военноморского флота для подъемников, подающих боезаряды из погребов к орудиям, а также для поворота орудийных башен и для рулевых устройств.

Применение электропривода на военных судах привлекло внимание гражданских специалистов. Например, в 1896 г. на подмосковных текстильных фабриках уже работали электроприводы постоянного тока.

Дальнейшее развитие электропривода связано с развитием городского электротранспорта в конце XIX в. В 1892 г. пущен трамвай в Киеве и Нижнем Новгороде, а несколько позже (1900 г. в Москве и в 1907 г. — в Петербурге).

Все описанные электроприводы являлись электродвигателями постоянного тока. Переменный ток применялся весьма редко.

Развитие электропривода переменного тока связано с работами М. О. Доливо-Добровольского, предложившего в 1889 г. систему трехфазного тока, а также с изобретением асинхронных двигателей с фазным и короткозамкнутым роторами. Простые по конструкции асинхронные электродвигатели, созданные в эксплуатации асинхронные электродвигатели создали необходимые условия для развития электродвигателя переменного тока.

В 1893 г. построены первые электростанции переменного тока в Шепетовке и на Коломенском заводе. По имеющимся данным в России в этот период было построено 209 асинхронных электроприводов общей мощностью 1507 кВт (2175 л. с.). Изобретение трансформатора П. Н. Яблочковым и И. Ф. Усагиным обеспечило возможность передачи электроэнергии на большие расстояния, что создало дополнительные условия для развития электропривода переменного тока. И в настоящее время это самый распространенный вид электропривода.

Русским ученым принадлежит первенство в разработке теории электропривода. В 1880 г. Д. А. Яковлев опубликовал научный труд «Электромеханические двигатели», заложивший основы науки об электродвигателях.

Д. А. Лачинов провел исследование к.п.д. электродвигателей, классифицировал их по системам питания, получил выражения для механических характеристик электродвигателей постоянного тока, разработал вопросы питания электродвигателя от автономного источника, показал преимущества развивающегося электропривода.

Однако царская Россия все же значительно отставала в развитии электротехники и, в частности, электропривода. Положение существенно изменилось

победы Октября. Реальным условием развития электропривода в первые годы выполнения плана ГОЭЛРО было увеличение мощностей электростанций и повышение выработки электроэнергии в нашей стране. Значительная часть выработанной электроэнергии потреблялась промышленными электроприводами, вытеснявшими паровой привод.

При паровом приводе все предприятия или группа цехов получали механическую энергию от одной паровой машины, приводившей в движение все трансмиссии цехов. Первым этапом развития электропривода в этих условиях был переход к групповому электроприводе. Вместо паровой машины устанавливался электродвигатель, а групповые трансмиссии в цехах оставались. Применение группового электропривода повысило энергетический к. п. д. предприятия, но не принесло существенного улучшения условий труда, повышения его производительности и улучшения качества продукции, поскольку технологическое оборудование предприятий оставалось устаревшим, а сохранившийся групповой трансмиссионный привод по-прежнему был достаточно сложным. Назрела необходимость создания электроприводов нового типа, обеспечивающих высокую эффективность работы и качество продукции.

Дальнейшее развитие электропривода связано с началом индустриализации страны, принятием первого пятилетнего плана. Основной тенденцией являлось разукрупнение электропривода, переход от группового электропривода к одиночному, а затем и к многодвигательному.

В одиночном электроприводе рабочую машину приводит в движение один электродвигатель. Все рабочие машины механически соединены с приводным двигателем передачами, расположенными на этой машине.

В многодвигательном электроприводе каждый рабочий орган машины приводится отдельным электродвигателем. Эти электроприводы позволяют предельно упростить механическую часть рабочей машины и до настоящего времени являются наиболее перспективными.

Для создания одиночного и многодвигательного электроприводов с автоматическими аппаратами управления необходимо было развитие электромашиностроения, электроаппаратостроения и других отраслей промышленности.

В первой пятилетке на заводе «Электросила» устанавливались мощные электроприводы постоянного тока, ртутные металлические выпрямители. Завод производил турбо- и гидрогенераторы, серии двигателей постоянного и переменного тока электротехническую продукцию.

Завод «Динамо» выпустил электроприводы низкого напряжения металлургической промышленности, электроприводы для подъемно-транспортных устройств, электродвигательное электрооборудование для городского электротранспорта, электропоездов и электровозов.

ХЭМЗ выпускал мощные электроприводы и электродвигатели общего применения, а также электроконтактную аппаратуру различного назначения для автоматизированных электроприводов. Одновременно с этим на ХЭМЗе были разработаны и выпущены станции автоматического управления как для электроприводов, так и для автоматизации технологических процессов.

Индустриализация страны потребовала создания научно-исследовательской базы для разработки электроприводов и проектных институтов аналогичного профиля.

Созданный в 1921 г. Всесоюзный электротехнический институт им. В. И. Ленина (ВЭИ) занимался проблемами автоматизации и созданием новых электроприводов. Московский экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков (ЭНИИ) разрабатывал новые конструкции станков, электроприводов и устройства автоматизации. Проектные институты Гипропром, Гипромез, Гипромаш и другие разрабатывали электроприводы для промышленных установок и станочных машин.

Значительный вклад в развитие отечественного электропривода внесли вузы страны. Ученые Ленинградского энергетического института, Ленинградского электротехнического, Ленинградского политехнического и Московского электротехнического и других вузов внесли значительный вклад в разработку и создание новых электроприводов, средств и систем управления.

В вузах шла подготовка инженерных кадров для электрификации промышленных предприятий, занятых разработкой электроприводов и автоматизации технологических процессов.

На заводах создавались проектно-технические отделы и заводские лаборатории для разработки и создания новых электроприводов и средств автоматического управления.

В развитии электропривода в годы первой пятилетки были достигнуты значительные успехи. Вот только некоторые из них:

1929 г. — пущены электропоезда на участке Москва — Мытищи;

1930 г. — на заводе «Электросила» создан ртутный металлический выпрямитель на 600 В и 2000 А для питания электроприводов постоянного тока, завод «Динамо» освоил производство комплексного электрооборудования для электропоездов;

1931 г. — завод «Электросила» создал комплект электрических машин для советского блюминга, в который входил электродвигатель мощностью 5148,5 кВт (7000 л. с.), два генератора по 5000 кВт и асинхронный двигатель мощностью 5000 кВт. Следует отметить, что подобные машины в то время выпускали только пять фирм капиталистического мира;

1932 г. — ХЭМЗ выпустил комплект устройств для управления первым советским блюмингом; на заводе «Электросила» создан ртутный металлический выпрямитель с сеточным управлением, положивший начало мощному ионному регулируемому электроприводу;

В конце 1932 г. был завершен первый пятилетний план и Советский Союз стал индустриально-аграрной страной.

Мощность электростанций в СССР достигла 4677 МВт, производство электроэнергии поднялось до 13,54 млрд. кВт·ч/год, что создало реальные предпосылки для развития электрификации страны, в том числе и развития электропривода. Коэффициент электрификации, под которым понимается отношение мощности электродвигателей к мощности всех работающих двигателей, в 1932 г. достиг 69%.

Во второй пятилетке продолжалось дальнейшее количественное и качественное развитие электропривода. Примером этого являлось создание многодвигательных электроприводов, обеспечивающих сложные технологические процессы и связанных общей системой управления, а также разработка и внедрение новых типов электроприводов и систем управления ими.

Наиболее важные работы этого периода:

1933 г. — ХЭМЗ создал систему автоматического управления для механизмов прокатных; завод «Динамо» выпустил первые советские лейбусы; Киевский политехнический институт производить конденсаторы для компенсации реактивной мощности, что способствовало развитию асинхронного электропривода;

1934 г. — разработан электропривод и первая система управления станком для фотоэлектрического копирования по чертежу; ХЭМЗ изготовил первый асинхронный электропривод для бумагоделательной машины с электрическим управлением; ЭНИМС выпустил первый электродвигательный электропривод агрегатных станков с электрическим управлением;

1935 г. — ВЭИ разработал тиристорный силовой регулируемый электропривод (пущена первая очередь Киевского метрополитена), систему сеточного управления и защиты ионных преобразователей, что имело большое значение для развития ионного регулируемого электропривода; завод «Электросила» выпустил ртутный выпрямитель с сеточным управлением на ток 2000 А и рабочим напряжением 825 В; на заводе «Динамо» им. С. М. Кирова выпущен электровоз с рабочим напряжением 1500 В и электровоз с реостатным торможением; на станкостроительном заводском градовском заводе им. Я. М. Свердлова начат выпуск пироваально-фрезерных станков с электронно-ионными регулирующими устройствами, обеспечивало высокое качество обработки деталей;

1937 г. — создана новая система электронного управления нажимными устройствами прокатных станков; развернуто производство станций автоматического управления электроприводом на основе релейно-контактных аппаратов; автоматизирован блюминг на металлургическом заводе в Донбассе; на заводе «Динамо» начат выпуск промышленных электродвигателей серии СО мощностью 880 кВт; разработана конструкция бесконтактного сельсина, нашедшего широкое применение в автоматизированном электроприводе; преемственность в теории автоматического регулирования частоты вращения; методы анализа, используемые для исследования электроприводов.

Приведенные примеры только частично отражают развитие отечественного электропривода, систем автоматизации производственных процессов и промышленных установок в годы второй пятилетки.

Начавшаяся в 1938 г. третья пятилетка характеризовалась фундаментальными работами советских ученых в области теории автоматического управления электроприводами и автоматизации производственных процессов. Внедрялись замкнутые системы управления электроприводами, обеспечивающие высокую точность регулируемых параметров. Развивалась теория и практическое применение регулируемого ионного электропривода большой мощности. Продолжались работы по созданию новых типов рабочих машин, в которых электроприводы все больше сближаются с рабочими органами, что способствовало упрощению кинематики, снижению металлоемкости, увеличению к. п. д. и повышению производительности труда.

Высшая школа развивала подготовку специалистов по электроприводу. Создавались новые кафедры в вузах страны, совершенствовалась лабораторно-исследовательская база, расширялись и углублялись профилирующие дисциплины. Электропривод сформировался в самостоятельное научно-техническое направление.

Во время Великой Отечественной войны электропривод развивался в направлениях, обеспечивающих потребности боевой техники, находящейся на вооружении Советской Армии. Для выполнения новых задач были использованы все достижения в области электропривода и автоматизации довоенного времени, разработаны новые типы электроприводов и систем управления, обладающие высокими тактико-техническими показателями.

После победоносного окончания Великой Отечественной войны наступил период восстановления и дальнейшего развития народного хозяйства СССР. Этот процесс вызвал дальнейшее развитие как теории электропривода, так и его прикладных направлений.

На протяжении 1945—1960 гг. развивалась теория автоматического управления электроприводами для линейных и нелинейных систем. Разрабатывались частотные методы анализа автоматизированных электроприводов, теоретические основы управления электроприводами с применением электромашинных усилителей. Повышалась единичная производительность технологичес-

кого оборудования, что вызывало рост мощностей электроприводов рабочих машин. Увеличивались электроприводы прокатных станов. Спущен на воду в мире атомный ледокол «Ленин» с мощной винтовой гребной установкой 24662 кВт (44 000 л.с.). Даны уникальные электроприводы подачи металлургических станков с диапазоном регулирования 2000, электроприводы с высокой точностью обработки координат. Продолжалось развитие ионного электропривода на основе мощных ртутных выпрямителей, разрабатывались системы ионного возбуждения электрических машин, появились транзисторные электроприводы, разрабатывалась их теория. Начиналось применение тиристорной техники в электроприводе. Разрабатывались вопросы частотного регулирования скорости электроприводов переменного тока, теория многодвигательного электропривода и электропривода с упругими элементами.

Период с 1961 г. по настоящее время характеризуется дальнейшим развитием теории электропривода автоматизированных систем управления на основе использования вычислительных машин, полупроводниковой техники, а также достижений математики, радиоэлектроники, электромеханики и других наук. Внедрен тиристорный электропривод и тиристорное возбуждение электрических машин. Разработаны методы построения и методы расчета электроприводов переменного тока на базе мощных полупроводниковых образцов частоты.

— Широко внедряется цифровая техника для автоматизации электроприводов, в частности, разработаны тиристорные цифровые регуляторы. Широкое применение получили аналоговые и цифровые вычислительные устройства и микро-ЭВМ для систем автоматизации электропривода. Разработаны методы синтеза систем автоматизированного электропривода, все более широкое развитие получают методы оптимального управления электроприводом. Развиваются быстродействующие электроприводы на основе использования специальных электрических машин с высокими динамическими характеристиками. Ведутся работы в области электроприводов нелинейными двигателями. Построены и вошли в эксплуатацию сверхмощные ледоколы «Арктика» и «Сибирь» с паротурбинными установками и электроприводами трехвинтовой гребной системы мощностью выше

4.2. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Все электроприводы постоянного тока в зависимости от способа возбуждения двигателя можно разделить на три группы: электроприводы с двигателями независимо, последовательного и смешанного возбуждения.

Самыми распространенными являются электроприводы с двигателями независимого возбуждения.

Основные свойства таких двигателей рассмотрены в п. 3.6, там же показана схема включения двигателя (рис. 3.15, а), получено выражение для механической характеристики

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_{я}}{c_e^2 \Phi^2} M$$

и дан вид этой характеристики (характеристика I на рис. 3.17).

Механическая характеристика является одним из основных критериев при выборе электродвигателя для привода производственного механизма и имеет важное значение для оценки его электромеханических свойств. Если в приведенном выражении для механической характеристики перейти от частоты вращения n к угловой скорости

$$\omega = \frac{\pi n}{30},$$

то уравнение механической характеристики можно представить в виде

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R_{я}}{(c\Phi)^2} M,$$

где $c = \frac{30c_e}{\pi}$ — конструктивный коэффициент, постоянный для данного электродвигателя.

Возможные способы регулирования скорости электродвигателя указаны в п. 3.6. Рассмотрим их более детально.

Наиболее распространенным способом регулирования скорости вращения является изменение напряжения на якоре электродвигателя. Из уравнения механической характеристики видно, что при повышении напряжения

лорежущих станков может достигать 2000. Такие диапазоны регулирования скорости могут быть получены только в замкнутых системах автоматического управления электроприводами.

Рассмотрим теперь электропривод с двигателем последовательного возбуждения, схема которого приведена на рис. 3.15, в.

Все выражения, полученные для электродвигателя с независимым возбуждением, остаются справедливыми и для электродвигателя с последовательным возбуждением. Механическая характеристика электродвигателя с последовательным возбуждением приведена на рис. 3.17 (характеристика 2). Частота вращения электродвигателя сильно зависит от момента на валу. При малых нагрузках частота вращения может значительно возрасти, а на холостом ходу может повыситься настолько, что приведет к разрушению электропривода. Эта особенность накладывает определенные требования на соединение вала электродвигателя с рабочим механизмом.

В электроприводах с двигателями последовательного возбуждения нельзя применять ременные передачи, муфты трения или другие устройства, допускающие временное отсоединение вала электродвигателя от рабочей машины.

Следует применять полумуфты, цилиндрические или червячные редукторы, а также другие виды передаточных устройств, обеспечивающих надежное постоянное соединение вала электродвигателя с валом рабочей машины.

Если момент электродвигателя с независимым возбуждением пропорционален току якоря, то момент электродвигателя последовательного возбуждения нелинейно зависит от тока. Магнитный поток при отсутствии насыщения магнитной системы пропорционален току, тогда момент будет пропорционален квадрату тока. Эта особенность электропривода с двигателем последовательного возбуждения обеспечила его применение в различных транспортных устройствах: трамваях, поездах метро, электровозах и т. п.

Для транспортных устройств идеальной механической характеристикой можно считать характеристику такого двигателя, который при постоянной мощности может создать достаточно большой момент, т. е. если $P = M\omega = \text{const}$. Угловая скорость такого двигателя обратно про-

порциональна моменту и уравнение механической характеристики имеет вид

$$\omega = \frac{\text{const}}{M}.$$

Механическая характеристика электродвигателя при последовательном возбуждении наиболее близка к гиперболической.

Такой двигатель легче переносит резкие изменения момента нагрузки, так как при увеличении в K раз потребляемый ток и мощность возрастает только в \sqrt{K} раз.

Электроприводы с двигателями смешанного возбуждения применяются главным образом в троллейбусном транспорте.

Рассмотренные механические характеристики электроприводов принято называть естественными. Они получены при номинальных параметрах питающей сети, нормальной схеме включения двигателя и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя.

В тех случаях, когда естественные характеристики удовлетворяют требованиям к электроприводу в различных режимах работы и технологическим требованиям производственной установки, используются также искусственные характеристики. Они получены при условиях, отличных от номинальных, т. е. при изменении индукции в цепи двигателя управляемыми проточными двигателями, при включении добавочных сопротивлений в цепь двигателя, а также за счет изменения схем возбуждения якоря и обмотки возбуждения. Практически любой вид механической характеристики может быть получен в замкнутых системах автоматического регулирования электроприводом.

4.3. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Различают электроприводы с асинхронными двигателями и с синхронными, а также с коллекторными двигателями переменного тока.

Электроприводы с асинхронными двигателями подразделяют на электроприводы с электродвигателями, имеющими короткозамкнутый ротор и ротор с обмоткой. Схемы включения асинхронных двигателей

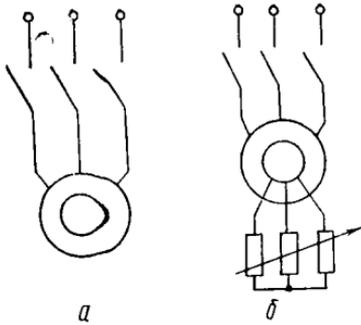


Рис. 4.1. Схемы включения асинхронных двигателей:
а — с короткозамкнутым ротором; *б* — с фазным.

приводит к снижению скорости и уменьшению момента двигателя. Поскольку момент, развиваемый двигателем, оказывается меньше момента нагрузки, то скорость резко снижается, вплоть до полной остановки. Поэтому при проектировании асинхронных электроприводов для того, чтобы исключить переход на неустойчивую часть характеристики, всегда определяют максимальное значение момента нагрузки на валу двигателя, создаваемого производственным механизмом. Максимальный момент выбранного для электропривода асинхронного двигателя должен быть больше наибольшего момента нагрузки.

Другим важным параметром электропривода с асинхронным короткозамкнутым двигателем является пусковой момент, соответствующий точке 3 на механической характеристике. При разработке такого электропривода двигатель следует выбирать так, чтобы его пусковой момент был больше пускового момента рабочей машины, т. е. момента сопротивления в неподвижном состоянии.

Естественная механическая характеристика двигателя с фазным ротором аналогична характеристике двигателя с короткозамкнутым ротором.

При введении добавочных сопротивлений в цепь ротора можно получить искусственные характеристики с повышенным пусковым моментом. Поэтому двигатели с фазным ротором преимущественно применяются для привода производственных механизмов с большим пусковым моментом.

приведены на рис. 4.1, а механическая характеристика — на рис. 3.24. Механическая характеристика асинхронного двигателя может быть разделена на два основных участка: устойчивый, находящийся между точками 1 и 2, и неустойчивый, лежащий между точками 2 и 3. Устойчивый участок относится к рабочей достаточно жесткой части характеристики. На неустойчивой части электропривод работать не может, так как увеличение момента нагрузки

Асинхронные электроприводы в основном применяются для производственных механизмов, не требующих регулирования скорости, или механизмов, для которых допускается ступенчатое регулирование скорости. Таковыми являются вентиляторы, насосы, конвейеры, транспортеры, эскалаторы, электрические краны и подъемники, которые металлорежущие станки, лифты, шлюзы, транспортные средства, машины текстильной и полиграфической промышленности и т. д.

Регулирование скорости асинхронных электроприводов связано с трудностями, определяемыми электрическими свойствами асинхронных двигателей.

В гл. 3 указывалось, что частота вращения ротора n отстает от частоты вращения n_0 магнитного поля статора. Это отставание выражается в относительных единицах и называется скольжением

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}.$$

Частота вращения поля статора зависит от частоты тока питающей сети и числа пар полюсов p , т. е.

$$n_0 = \frac{60f}{p},$$

отсюда частота вращения ротора

$$n = \frac{60f}{p} (1 - s).$$

Из полученного выражения следует, что частоту вращения асинхронного электропривода можно регулировать изменением частоты тока питающей сети или изменением числа пар полюсов p обмотки статора.

Изменение частоты тока источника питания позволяет плавное регулирование частоты вращения электропривода с достаточно высокой точностью. Такое регулирование носит название частотного и реализуется с помощью преобразователей частоты.

В настоящее время серийно выпускаются различные преобразователи частоты, однако они довольно сложны и дорогостоящие, поэтому частотное регулирование скорости еще не получило широкого распространения.

Для регулирования частоты вращения за счет изменения числа пар полюсов требуются специа-

люсопереключаемые (многоскоростные) двигатели. Этот способ регулирования применяется сравнительно редко, так как обеспечивает только ступенчатое изменение частоты вращения и не избавляет производственные машины от коробок скоростей, хотя несколько упрощает их конструкцию.

Синхронные электроприводы применяются для производственных установок большой мощности при постоянстве частоты вращения рабочего органа.

Схема включения синхронного двигателя и его механическая характеристика приведены на рис. 4.2. Характерной особенностью синхронного двигателя является то, что изменение нагрузки на его валу в определенных пределах не влияет на частоту вращения. Эта особенность связана с электромеханическими свойствами самого двигателя. Применение синхронных электроприводов позволяет также улучшить энергетические показатели предприятия за счет повышения коэффициента мощности (см. п. 3.8).

Синхронные двигатели применяются для привода насосов, мощных вентиляторов, компрессоров, турбовоздуходувок, преобразовательных агрегатов и некоторых других машин и механизмов.

Электроприводы с регулируемыми коллекторными двигателями переменного тока применяются сравнительно редко. Маломощные коллекторные двигатели используются в бытовых электроприводах, которые могут работать как от сети переменного, так и постоянного тока. Примером может служить электропривод пылесоса, полотера и др.

Оригинальным вариантом электропривода переменного тока является электропривод с линейными асинхронными двигателями. В области линейных электродвигателей советские ученые работали с начала 1920-х годов. В их числе можно назвать Я. С. Ямпольского, М. П. Костенко, А. Г. Иосифьяна, Б. Д. Садовского, Г. И. Штурмана и других.

Линейный электродвигатель является электромеханическим преобразователем электрической энергии в механическую

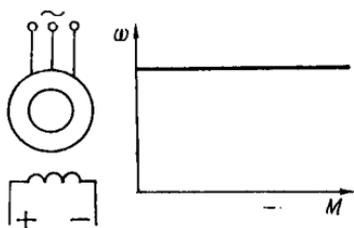


Рис. 4.2. Схема и механическая характеристика синхронного двигателя.

при поступательном или возвратно-поступательном движении. Если в электроприводах вращательного движения необходимо применять дополнительные устройства преобразования вращательного движения в поступательное, то в электроприводе с линейным движением они не требуются.

4.4. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Работа каждого электропривода связана с движением с установившейся скоростью и с ускорением. В некоторых электроприводах в процессе работы могут потребоваться не одна, а несколько установившихся скоростей. Например, электропривод продольно-сверлильного станка вначале работает с малой скоростью при резке в металл, а в процессе резания скорость повышается и сохраняет заданное по условиям обработки значение. Перед выходом резца из металла скорость вновь снижается для предотвращения выкрашивания металла и снижения качества обработки детали. Если деталь не сплошная, а имеет проемы, то эти участки она проходит на повышенной скорости, поскольку в это время не производится, а повышение скорости в проемах увеличивает производительность труда.

Аналогичный пример можно провести с реверсивным обжимным прокатным станом, электропривод которого производит захват заготовки валками на малой скорости, прокатывает заготовку на большой скорости и сбрасывает ее из валков на малой скорости, чтобы она не выехала далеко от клетки стана и этим не увеличивалась длина цикла, не снижалась производительность станка.

Статическим или установившимся режимом работы электропривода принято называть режим, который характеризуется работой двигателя с неизменной скоростью, а также равенством движущего момента двигателя и момента сопротивления. Эти величины являются требованиями технологического процесса. Тот же электропривод должен работать в различных статических режимах, что связано с требованиями технологического процесса. Например, станок при черновой обработке детали работает с малой скоростью при большом усилии резания. Такую работу требует соответственно от электропривода малая скорость и большого вращающего момента. Чистовая обработка изделия проводится при высокой скорости.

ния и малом усилии на резце, что соответствует большой скорости электропривода при малом статическом моменте.

Для выполнения требований технологического процесса необходимо, чтобы электропривод имел соответствующие статические характеристики. Это условие может быть выполнено при проектировании электропривода в комплексе с системой управления.

Рассмотренные ранее механические характеристики являются статическими, поскольку на них каждому значению установившегося момента соответствует установившаяся величина угловой скорости.

В современных технологических процессах требуется изменение в широких пределах как моментов нагрузки, так и рабочих скоростей, поэтому электропривод должен иметь множество статических характеристик, полностью отвечающих самым высоким требованиям технологического процесса. Это обеспечивается применением регулируемых преобразователей, питающих электропривод, и замкнутых систем управления.

Возможный вид семейства статических характеристик приведен на рис. 4.3. Применение бесконтактных аппаратов управления разрешает получить множество статических характеристик, а применение замкнутых систем управления гарантирует их высокую жесткость. В современных электроприводах статические характеристики могут иметь различный вид, в том числе ломаной линии и т. п.

Динамическим или переходным режимом электропривода называется режим его работы при переходе от одного установившегося состояния к другому. В динамическом режиме изменяется ток якорной цепи, момент и скорость. При разработке и исследовании электроприводов необходимо знать, как эти величины изменяются во времени, поскольку это позволяет определить длительность и характер переходного процесса, его соответствие требованиям режима работы механизма, оценить в динамическом режиме величину тока, момента, ускорения, которые определя-

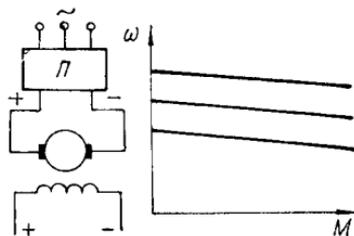


Рис. 4.3. Схема и механические характеристики регулируемого электропривода постоянного тока.

ют механические и электрические перегрузки в приводе, рассчитать мощности и выбрать двигатель, работать систему управления электроприводом.

Динамические режимы занимают видное место в теории и практике электропривода. Это связано как с возможностью ограничения динамических усилий, так и с необходимостью достижения разрушающих значений, так и с требованием обеспечить необходимое быстродействие, исходя из производительности установки.

По характеру динамических режимов все электроприводы можно разделить на две категории: 1) электроприводы, для которых характерным является установившийся режим работы с редкими пусками, остановками и переходами от одной скорости к другой; 2) электроприводы, для которых динамические режимы являются основными, и скорость их протекания определяет эффективность работы электропривода.

К первой категории относятся электроприводы металлорежущих станков токарной группы, непрерывно работающих катаных станов; линий по производству погонажных изделий из пластмасс и др.

Ко второй категории следует отнести электроприводы реверсивных прокатных станов, электроприводы продольно-строгальных станков и др. Для них характерны частые пуски, торможения, реверсирования, переходы от одной скорости к другой.

Если динамические режимы являются основными режимами работы некоторого электропривода, то их длительность во многом определяет производительность промышленной установки. Например, производительность прокатки заготовки на обжимном прокатном стане зависит в том, что она вначале прокатывается в одном направлении, затем стан реверсируется и заготовка прокатывается в обратном направлении. Процесс продолжается до тех пор, пока заготовка не будет обжата до требуемых размеров, на что затрачивается 85,8 с. Предельное время переходного процесса на протяжении которого пропуск увеличивается на 1 с. Это приведет к увеличению времени на прокат одной заготовки на 17 с, что существенно снизит производительность прокатного стана. Улучшение времени каждого пропуска на такое же количество приведет к сокращению времени на прокат одной заготовки и к повышению производительности прокатного стана.

Динамические режимы электропривода не являются произвольными процессами. Требования к величинам, определяющим характер и полное время протекания процесса, задаются условиями технологического режима. Эти требования (время протекания переходного процесса, допустимая величина якорного тока, величина ускорения и замедления) являются исходными данными при разработке электропривода и системы автоматического управления.

Рассмотрим возможные пути управления динамическими режимами электропривода.

На основании закона Ньютона динамическое усилие $F_{\text{дин}}$, равное произведению массы тела m на ускорение a , равно разности $F_{\text{дв}}$ и $F_{\text{с}}$, т. е.

$$F_{\text{дин}} = ma = F_{\text{дв}} - F_{\text{с}}$$

Для вращательного движения эту зависимость можно представить в виде

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{д}} - M_{\text{с}}$$

где J — момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя; $M_{\text{д}}$ — момент, развиваемый электродвигателем; $M_{\text{с}}$ — момент сопротивления, создаваемый рабочим органом машины; $\frac{d\omega}{dt}$ — угловое ускорение.

Приведенное выражение называется уравнением движения электропривода.

Разность моментов электропривода и рабочей машины называется динамическим моментом

$$M_j = M_{\text{д}} - M_{\text{с}}$$

Используя понятие динамического момента, можно записать уравнение движения электропривода как

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_j,$$

откуда

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_j}{J}.$$

Найденное выражение показывает, что момент электропривода пропорционально динамическому моменту и обратно пропорционально приведенному моменту инерции электропривода, а также позволяет сделать практический вывод: управление динамическим моментом электропривода непосредственно связано с изменением его динамического момента.

Для пояснения физической сущности понятия динамического момента рассмотрим следующий пример. Если велосипедист движется с неизменной скоростью, то развиваемый им момент равен моменту сопротивления движению велосипеда, следовательно, момент равно нулю и режим является статическим. Для изменения скорости движения велосипедист должен изменить динамический момент, увеличив силу нажатия на педали, что приведет к ускорению движения велосипеда. Достигнув нужной скорости, велосипедист снизит прилагаемое к педалям динамическое усилие, момент равным нулю и велосипедист будет двигаться с постоянной более высокой скоростью. Мозг и нервная система велосипедиста управляют динамикой движения велосипеда. В электроприводе эти функции выполняет система управления. Момент, развиваемый электродвигателем пропорционален произведению тока якоря и магнитного потока, т. е.

$$M_d = c \Phi I_a,$$

поэтому изменять моменты электродвигателя можно, изменяя ток якоря или магнитный поток двигателя.

При неизменном магнитном потоке увеличение тока якорной цепи приводит к возрастанию динамического момента, следовательно, к ускорению электропривода. Повышение скорости обычно обеспечивается за счет увеличения напряжения преобразователя, питающего якорь двигателя.

Рассмотренные выше примеры относятся к режиму движения с положительным динамическим моментом. Однако в процессе управления динамическими режимами электропривода при необходимости может быть получен и отрицательный момент двигателя. В этом случае динамический момент

$$M_j = -M_d - M_c$$

отрицательный и будет происходить замедление

тропривода, что подтверждается также знаком минус в следующем выражении:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{M_j}{J}.$$

Исследование динамических режимов электроприводов выполняется с помощью осциллографов. Эти приборы предназначены для записи на фотопленку тока, скорости, напряжения и других величин, интересующих исследователей динамических режимов.

На рис. 4.4 приведена осциллограмма одного цикла работы электропривода блюминга мощностью 8826 кВт (12000 л. с.) с номинальной частотой вращения 65 об/мин и максимальной 90 об/мин. На осциллограмме представлен цикл работы, при котором электропривод ускоряется до частоты вращения 65 об/мин, работает в установившемся режиме, затем тормозится, реверсируется, снова работает с установившейся частотой вращения 65 об/мин и останавливается.

На осциллограмме показаны ток якорной цепи $I_{я}$, напряжение источника питания $U_{г}$, частота вращения n и ток возбуждения двигателя $I_{в.д.}$.

Из приведенной осциллограммы видно, что разгон электропривода происходит за 2,1 с, а торможение длится 1,93 с. Такая длительность переходных процессов характеризует высокие динамические свойства электропривода. Время движения с установившейся скоростью определяется длиной прокатываемой заготовки. По мере обжатия заготовки ее длина возрастает и продолжительность работы с установившейся скоростью увеличивается.

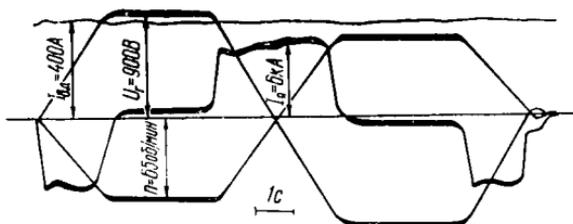


Рис. 4.4. Осциллограмма, характеризующая работу электропривода блюминга.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

5.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОСОБЕННОСТИ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ

Под технологическим (производственным) процессом понимают целенаправленное воздействие на материал с целью такого изменения его размеров, формы, структуры, химических или каких-либо иных свойств, необходимо для получения требуемой продукции.

На каждом предприятии независимо от его масштабов выделяют основной (рабочий) производственный процесс (может быть несколько основных или вспомогательных процессов) и вспомогательные производственные процессы.

Под рабочим процессом понимают, как правило, действие различных видов энергии на исходный материал (или материалы). Сюда же можно отнести процессы транспортировки материала и энергии.

Вспомогательные производственные процессы выполняются специфическими особенностями производства. Они необходимы для обслуживания основного производства и обеспечения бесперебойного выпуска продукции.

Механизация производственного процесса заключается в замене мускульного труда человека машинными средствами, что позволяет увеличить производительность труда, а человеку функции управления машиной и контролем процесса.

Высшей ступенью механизации является полная механизация, при которой предусматривается замена ручного труда машинным на основных и вспомогательных этапах производственного процесса.

Дальнейшим этапом в совершенствовании производства является автоматизация производственных процессов, т. е. осуществление процесса без непосредственного участия обслуживающего персонала. В этом случае функции управления, а также защиты, контроля, сигнализации передаются специальным автоматическим устройствам. Роль человека ограничивается наладкой,

кой, ремонтом оборудования и общим наблюдением за ходом производственного процесса.

Развитие автоматизации в настоящее время является объективной необходимостью, важнейшим средством обеспечения резкого качественного скачка в процессе производства, увеличении производительности труда и улучшении технико-экономических показателей.

Первая особенность автоматизации обусловлена тем, что физиологические особенности человека в ряде случаев сдерживают дальнейшее совершенствование производства. Лишь при передаче функций управления машинам оказывается возможным создание нового высокопроизводительного оборудования, повышение качества продукции.

Второй особенностью автоматизации является возможность обеспечить управление в опасных для человека, труднодоступных или вообще недоступных сферах. Примерами могут служить атомные электростанции, ядерные двигатели, исследования в космосе и пр.

В качестве третьей особенности автоматизации следует указать на возможность повышения эффективности умственной деятельности человека. Благодаря автоматизации оказывается возможным быстро решать сложные логические задачи, производить вычисления, переводить с одного языка на другой, ставить правильный врачебный диагноз и пр.

Следует подчеркнуть также четвертую особенность автоматизации, имеющую социальное значение. Автоматизация приводит к коренным изменениям характера труда, повышению культурного уровня обслуживающего персонала. Этим создаются предпосылки для стирания граней между умственным и физическим трудом.

Основной составной частью автоматизации является управление. Под управлением понимается целенаправленное действие, вносящее желаемые изменения в ход процесса, основанное на использовании сведений (информации) об этом процессе. Эта информация может иметься до начала процесса (начальная информация) или поступать при его осуществлении (рабочая информация).

На современном этапе автоматизации производства высшей ступенью следует считать создание и внедрение в промышленность автоматизированных систем управления — АСУ.

Возникновение АСУ связано с появлением сложных задач управления, что неизбежно ведет к усложнению применяемых техник и методов их решения.

При усложнении задач управления «вольные» решения могут привести к существенным ошибкам. Для решения современных задач необходимо применение строго научных методов, базирующихся на истинности современных достижений технической кибернетической вычислительной техники, математики и ряда других научных направлений.

Принимаемые решения должны быть наилучшими при данных условиях (ограничениях). Они должны решаться в наилучшем (оптимальном) образе.

Основными характерными особенностями управления АСУ являются:

1. Наличие большого количества взаимосвязанных достаточно сложных объектов, которые образуют единую (или большую) систему. Управление этой системой необходимо рассматривать как единый процесс.

2. АСУ характеризуются обязательным использованием ЭВМ и различных технических средств и методов при помощи которых осуществляется сбор информации о работе системы, ее передача, обработка, хранение и использование.

3. Применение математических методов, позволяющих осуществлять оптимальное управление при определенных ограничениях, а также прогнозировать поведение системы в будущем.

Различают три основных аспекта управления: технологический, экономический и социологический.

Решение технико-технологических задач осуществляется применительно к технологическим процессам в цехах производственных предприятий. Решаются автоматизированными системами управления технологическими процессами АСУТП. Для решения экономических задач служат автоматизированные системы планирования и управления — АСПУ.

АСУ, осуществляющее ряд основных функций государственного министерства, называют отраслевыми АСУ, АСУ предприятиями — АСУП. В будущем ожидается появление АСУ по управлению народным хозяйством страны в целом.

5.2. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

Автоматизация производственных процессов осуществляется с помощью автоматических устройств. Поскольку при автоматизации производственных процессов приходится решать задачи различной сложности, то под понятием «устройство» часто понимают самые различные по сложности изделия. Так, устройством часто называют сравнительно простые реле, предназначенные для отключения двигателей при перегрузке по току или перегреве подшипников. В то же время могут быть относительно сложные устройства, предназначенные, например, для решения задачи регулирования хода подъемных машин (устройства динамического торможения) и др.

В зависимости от выполняемых функций при автоматизации процессов различают следующие виды автоматических устройств:

1. Устройства автоматического контроля. С их помощью контролируются изменения параметров объекта автоматизации, самого процесса, состояния внешней среды и пр. Примерами таких устройств могут служить устройства контроля температуры подшипников электродвигателя, уровня воды в водосборниках, скорости движения машин и пр.

2. Устройства автоматической сигнализации. Они обычно работают совместно с устройствами автоматического контроля и дают сигналы (оптические, звуковые) об отклонениях от заданного режима работы или о необходимости его изменения. Например, существует сигнализация о перегреве подшипников мощных стационарных установок, об опасном уровне воды в водосборниках, о достижении предельного значения содержания газов в производственной атмосфере и пр.

3. Устройства автоматической защиты. Эти устройства предназначены для защиты установок или их отдельных элементов от режимов работы, которые могут привести к повреждению оборудования. Широко применяются токовая защита, минимальная и нулевая (от уменьшения и исчезновения напряжения), от утечек тока, газовая защита трансформаторов и др. Устройства автоматической защиты часто действуют совместно с устройствами сигнализации об аварийном отключении установки.

4. Устройства автоматического управления. Устройства этого вида должны обеспечивать изменение некоторой величины или же протекание какого-либо процесса. К ним относятся сравнительно простые устройства, обеспечивающие определенную последовательность операций при пуске электродвигателя переменного тока и требуемый режим его работы. Примером более сложных устройств являются регуляторы скорости электроприводов. С их помощью обеспечивается стабилизация частоты вращения или изменение по заданной программе при изменении нагрузки в зависимости от каких-либо иных факторов.

Кибернетическими устройствами управления являются устройства, настройка которых автоматическим образом осуществляется в процессе работ в зависимости от получаемой информации о ходе протекания процесса и изменении его условий. Для этого следует получать дополнительные сведения во время работы объекта, так как на основании имеющихся сведений недостаточно для решения задачи управления. Кибернетические устройства часто решают логические задачи. Примером может служить устройство, предназначенное для регулирования уличного движения на перекрестках, которое дает разрешающий сигнал с учетом количества автомобилей на какой-либо стороне перекрестка и времени их ожидания.

5. Вычислительные устройства. Электронные вычислительные устройства могут решать системы дифференциальных уравнений, определять наилучшие законы изменения некоторых параметров, переводить с одного языка на другой и пр. Вычислительные устройства обычно являются неотъемлемой частью кибернетических устройств автоматического управления.

Под системой автоматического управления понимают совокупность (включающую объект управления) отдельных устройств, которые соединены определенным образом друг с другом и обеспечивают решение поставленной задачи управления объектом.

Примером может служить система динамического торможения подъемной машины. Она состоит из двигателя, которым является сама подъемная машина, и исполнительных устройств: динамического торможения, контроллера задания скорости, исполнительных устройств.

Функциональной схемой системы автоматического управления называют систему элементов, обозначенных на рис. 1.1.

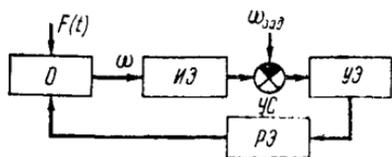


Рис. 5.1. Функциональная схема системы регулирования.

в виде прямоугольников, расположенных в последовательности, соответствующей действию их друг на друга. Направление воздействия указывается стрелками. На рис. 5.1 показана функциональная схема системы регу-

лирования угловой скорости ω некоторого объекта O , на который действует внешняя сила $F(t)$. Измерительный элемент $ИЭ$ контролирует изменение угловой скорости и выдает пропорциональную ей величину, которая в узле сравнения $УС$ сопоставляется с заданной величиной $\omega_{зад}$. Величина, пропорциональная отклонению действительной скорости от заданного значения, поступает к управляющему (усилительному) элементу $УЭ$. Он воздействует на регулируемый элемент $РЭ$, который изменяет режим работы объекта O таким образом, чтобы привести его скорость к требуемому значению.

Характерной особенностью рассмотренной системы является то, что она замкнута, т. е. на вход системы подается информация о значении выходной величины, которое сравнивается с заданным значением. В рассмотренной системе осуществлен наиболее распространенный принцип регулирования по отклонению выходной величины.

В настоящее время наиболее часто системы автоматического управления классифицируют по информативному принципу. При этом под «информацией» понимают совокупность сведений, источником которых служит опыт. Различают начальную (априорную) и рабочую информацию.

Начальной называют информацию, которая необходима для проектирования и дальнейшей нормальной работы системы. Она должна быть в распоряжении до начала работы системы. Начальная информация является полной, если ее достаточно для разработки и функционирования некоторой системы с требуемой точностью на весь период эксплуатации. В процессе работы таких систем не возникает необходимость получения дополнительной информации для изменения задачи или настройки данной системы.

Системы автоматического управления (САУ) с полной начальной информацией называют обыкновенными

системами управления. Это наиболее старый изученный класс систем автоматического управления.

Обыкновенные замкнутые системы автоматического регулирования (САР) базируются на принципе регулирования по отклонению регулируемой величины от заданного значения (принцип Пид Уатта).

Если начальной информации оказывается недостаточно для решения поставленной задачи и возникает необходимость в дополнительной информации, то такие системы называют системами с неполной начальной информацией. Они образуют класс кибернетических систем автоматического управления. Их можно разделить на два подкласса: самонастраивающиеся системы и адаптивные системы.

На рис. 5.2 показана таблица классификации систем автоматического управления.

В настоящее время самонастраивающиеся системы интенсивно развиваются, разрабатываются новые системы, предназначенные для применения в различных отраслях промышленности.

Различают три основных вида САУ: экстремальные системы регулирования, с самонастраивающимися корректирующими устройствами и самооптимизирующиеся системы.

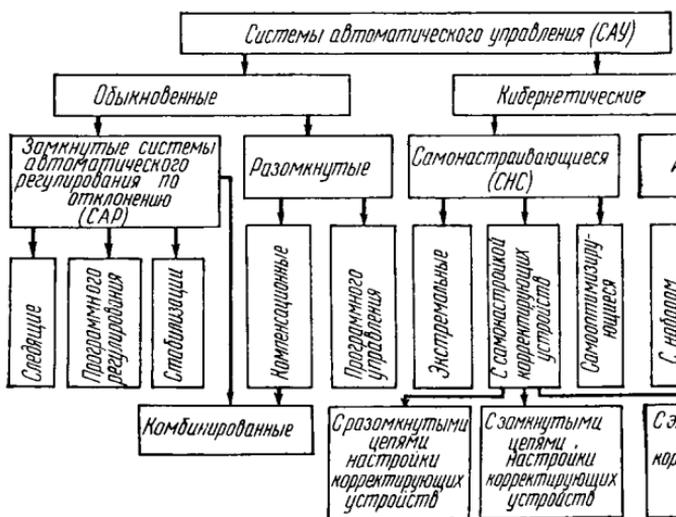


Рис. 5.2. Классификация систем автоматического управления.

Системы экстремального регулирования предназначены для поддержания регулируемой величины на уровне, соответствующем экстремуму некоторой функции, при изменении внешних условий. При этом оптимальное значение регулируемой величины при различных внешних условиях также изменяется.

Пусть регулируемая величина y является функцией двух величин — λ регулирующего параметра x и характеристики внешних условий (рис. 5.3). При изменении λ максимальное (экстремальное) значение функции $y = f(x, \lambda)$ будет изменяться (y_1, y_2, y_3) и может быть достигнуто при различном значении регулирующего параметра x_1, x_2, x_3 . Самонастройка системы будет состоять в установлении такого значения параметра x , при котором может быть получено максимальное значение регулируемого параметра y для данного значения λ .

Примером экстремальной СНС может служить САУ угледобывающей машины, задача которой состоит в обеспечении минимального расхода энергии на единицу веса добытого угля.

Игровые системы могут применяться при наличии многих взаимосвязанных объектов. Задачу автоматического управления в этом случае иногда можно рассматривать как проведение некоторой игры. В такой игре должны принимать участие не менее двух сторон. Действия сторон могут быть случайными (стохастическими) или частично подчиняться некоторым правилам — алгоритмам. В этом случае процессы управления могут быть записаны в виде некоторых зависимостей (детерминированные процессы).

«Игра» обычно состоит из ряда последовательных этапов (шагов).

Основной особенностью игровых САУ является метод формирования команд управления, который заключается в сопоставлении возможных различных решений на данном этапе управления. Критерием при сравнении различных решений является так называемая функция выгоды. Функция выгоды должна быть задана заранее на основе предварительного

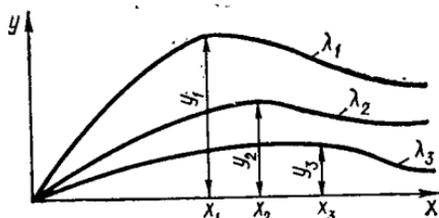


Рис. 5.3. Характеристики экстремальной САУ.

анализа операции управления. Решение, соответствующее максимальному значению функции выгоды, считается оптимальным.

Обязательным элементом игровой САУ является управляющая машина. Ее задача состоит в выборе из большого количества возможных решений оптимального. Принятое решение исполняется для воздействия на управляемый процесс.

В САУ с набором шаблонных решений оптимальное решение определено заранее для множества действий противоположной стороны (предполагается, что в игре участвуют две стороны). Управляющая машина устанавливает соответствие действий второй стороны тому из ранее рассчитанных вариантов и на этой основе формирует команду управления для поведения первой стороны.

Недостатком САУ этого вида является очень большое количество возможных вариантов решений, которые требуют большой емкости запоминающих устройств. Кроме того, информация о действии второй стороны может быть недостаточно полной. В этих условиях трудно установить соответствие действительного состояния с одним из рассчитанных вариантов. САУ с автоматическим выбором решений являются более совершенными. В этих САУ управляющая машина самостоятельно решает задачу оптимального выбора (решения) на каждом этапе операции. Процесс действия такой САУ происходит следующим образом: на основе начальной информации о действии второй стороны, управляющая машина, получив информацию о действии второй стороны, определяет оптимальное решение для начального этапа. После этого вычисляет функцию выгоды и выбирает оптимальное решение.

Машина формирует команды управления, соответствующие оптимальному решению, которые поступают на исполнительные механизмы. Аналогично действует система на втором и последующих этапах работы.

Процесс управления в САУ с автоматическим выбором решений является замкнутым и дискретным. Такие САУ являются одним из наиболее перспективных классов систем автоматического управления.

5.3. ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ЭЛЕКТРОПРИВОД ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Современный электропривод, как правило, является автоматизированным. Он широко применяется во всех отраслях промышленности, транспорта, в сельском хозяйстве.

Универсальные свойства электроприводов, простота управления и автоматизации, возможность выполнения разнообразных требований обеспечили его самое широкое распространение.

Принимая во внимание ограниченный объем книги, в качестве примера более детально рассмотрим особенности применения электропривода и его автоматизации лишь в одной отрасли — в горной промышленности и кратко остановимся на более ярких примерах других отраслей.

Электропривод горной промышленности является одним из наиболее сложных, мощных и разнообразных отраслевых электроприводов. Специфические особенности электропривода данной отрасли определяются разнообразием технологических и внешних условий производства горных работ.

По технологическим особенностям добычи полезного ископаемого (угля, руды) электроприводы горной промышленности делятся на: электроприводы для открытых и подземных горных работ.

Электроприводы для открытых горных работ. В последнее время все большую часть полезных ископаемых стремятся добывать открытым способом, более экономичным даже при сравнительно глубоком залегании полезного ископаемого (до 350 ... 450 м). Примерами могут служить Коркинские угольные карьеры, проектная глубина разработки которых составляет 350 м, Соколовский, Сербайский рудные карьеры с проектными глубинами до 450 м. Развитию этого способа добычи в СССР способствуют огромные запасы полезных ископаемых, залегающих на сравнительно небольших глубинах. В качестве примера можно указать на Канско-Ачинское угольное месторождение, общие запасы которого составляют около 450 млрд. т.

При добыче полезных ископаемых открытым способом можно выделить три основных технологических процесса — производство вскрышных работ, т. е. снятие слоя

земли и породы, расположенных над полезными ископаемыми; производство добывающих работ; транспорт вскрышных пород в отвалы, а полезного ископаемого — железнодорожными вагонами, кузова самосвалов.

Каждый из перечисленных технологических процессов добычи осуществляется при помощи особых механизмов, режимы работы которых определяются условиями к применяемым электроприводам.

Для производства вскрышных работ часто используются одноковшовые экскаваторы — механические или на ЭВГ, иногда роторные шагающие экскаваторы, ЭРШ, или шагающие экскаваторы-драглайны. Для производства добывающих работ также используются экскаваторы типа механической лопаты или Перспективными являются роторные экскаваторы.

Горная масса может транспортироваться ленточными конвейерами, отвальными транспортерами, ленточными конвейерами, отвальными транспортерами.

Электропривод одноковшового экскаватора должен обеспечить его перемещение, напор ковша для забоя в забой, подъем ковша на требуемую высоту и его для выгрузки добытой горной массы в транспортное устройство или бункер.

Поскольку для каждой из указанных операций требуется обеспечить различные характеристики работы, целесообразно использовать для механизмов экскаватора индивидуальные приводные двигатели.

Общей особенностью индивидуальных электроприводов механизмов напора, подъема, поворота является необходимость получения так называемых экскаваторных характеристик. Эти характеристики должны быть жесткими при нормальных нагрузках и упругими при перегрузках. Вследствие резкого изменения скорости при больших моментах нагрузки мощность при производстве момента и скорости, снижается самым эффективным способом обеспечивается предохранение электропривода и механических элементов экскаватора от перегрузок и поломок.

Экскаваторные характеристики трех различных типов показаны на рис. 5.4. На рабочих участках 1 , 2 , 3 которых обозначены буквами a , b , v , при увеличении момента нагрузки M скорость ω изменяется нелинейно. Например, для характеристики 1 на рабочем участке скорость уменьшается на $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1$. При достижении предельного значения момента для данного

($M_{отс1}$, $M_{отс2}$ или $M_{отс3}$) скорость резко уменьшается и при росте момента до M_{max} двигатель останавливается.

Экскаваторные характеристики оцениваются коэффициентом отсечки

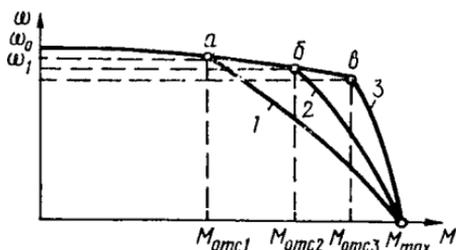


Рис. 5.4. Экскаваторные характеристики.

$$K_{отс} = \frac{M_{отс}}{M_{max}} .$$

Для двигателей механизма подъема $K_{отс} = 0,7 \dots 0,8\%$; двигателей напора — $0,6 \dots 0,7\%$; поворота — $0,8 \dots 0,9\%$.

Максимальный момент M_{max} часто называют моментом стопорения.

Двигатели экскаватора должны быть регулируемы и обеспечивать плавное изменение скорости в заданном диапазоне. В роторном экскаваторе электропривод должен обеспечить вращение роторного колеса и его перемещение вдоль забоя.

Электроприводы экскаваторов могут быть переменного и постоянного тока. В электроприводах постоянного тока наиболее распространенным способом электроснабжения двигателей отдельных механизмов является их питание от специальных генераторов постоянного тока, приводимых во вращение так называемым сетевым асинхронным или синхронным двигателем. Возможно также питание и от мощной преобразовательной установки, состоящей из полупроводниковых выпрямителей, преобразующих переменный ток сети в постоянный.

В зависимости от емкости ковшей и производительности экскаватора, мощность двигателей может составлять от нескольких сотен до десятков тысяч киловатт.

Например, в шагающем экскаваторе типа ЭШ-125/125, имеющем стрелу длиной 125 м и ковш емкостью 125 м³, мощность сетевого двигателя составляет 28 200 кВт.

Для разработки Канско-Ачинского месторождения считается целесообразным применение экскаваторов производительностью 10 ... 12,5 тыс. м³/ч. Такой поток угля может быть обеспечен при использовании высокопроизводительных роторных экскаваторов, мощность электропривода которых будет составлять десятки тысяч киловатт.

Характерной особенностью экскаваторов (торных) является прерывный режим работы элеваторов. Им присуще наличие вибрации, тряски, повышенной влажности, резких колебаний температур.

Электрооборудование экскаваторов-драгла типа «механическая лопата» размещается в основной поворотной платформе. Возможная функциональная схема электрооборудования небольшой и средней мощности экскаваторов с приводами постоянного тока приведена на рис. 5.5. Один мощный сетевой двигатель переменного тока *СТД* вращает несколько генераторов *Г1*, *Г2*, *Г3*, от которых получают питание двигатели основных механизмов — напора, подъема, поворота ковша. От каждого генератора (на схеме не показан) питаются также вспомогательных установок и механизма шагания.

Генераторы *Г1*, *Г2*, *Г3* с соответствующими двигателями *М1*, *М2*, *М3* образуют так называемые генератор-двигатели (*Г — Д*). Характеристики получаются за счет требуемого из сети напряжения, подводимого к двигателям. Поскольку вращение мощного сетевого двигателя является причиной изменения напряжения на выходе генератора, то изменение напряжения на выходе можно получить за счет изменения напряжения на обмотках возбуждения *ОВ1*, *ОВ2*, *ОВ3* генераторов. Для этой цели служат регулирующие устройства *РУ1*, *РУ2*, *РУ3*. В качестве регулирующих устройств применяются электромашинные и магнитные усилители, а также трансформаторные преобразователи.

Сигналы управления *СУ1*, *СУ2*, *СУ3* формируются в них на основе сигналов *С1*, *С2*, *С3*. После обработки они поступают в обмотки возбуждения генераторов.

В мощных экскаваторах применяются трансформаторные приво-ды генераторов с двигателями — основными механизмами экскаватора.

Электроприводы для подъемных работ. Общепринятой схемой электрооборудования (электрооборудование) применяемых в этих условиях,

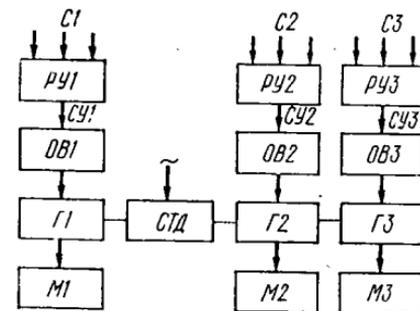


Рис. 5.5. Функциональная схема электрооборудования экскаваторов малой и средней мощности.

особые требования к его изготовлению, определяемые наличием влаги, взрывоопасных смесей в рудничной атмосфере, ограниченными размерами горных выработок (особенно лавы). Основное требование к электрооборудованию — повышенная механическая прочность, высокая надежность.

Электрооборудование, применяемое в подземных условиях, делится на две группы — для стационарных и передвижных установок.

К *стационарному* относится электрооборудование вентиляторных, подъемных, водоотливных, компрессорных и некоторых конвейерных установок. Хотя все эти установки обеспечивают ведение подземных горных работ, но некоторые из них (вентиляторные, подъемные, компрессорные) располагаются на поверхности шахты.

Основными *передвижными* установками шахты являются угледобывающие и проходческие машины и комплексы, передвижные конвейеры (в лаве) и электровозный транспорт.

На поверхности шахты применяют электрооборудование в открытом и защищенном (закрытом) исполнении. Внутри шахты — в рудничном нормальном (РН), повышенной надежности (РП) (в шахтах, не опасных по газу и пыли) или во взрыво- (РВ), а также искробезопасном исполнении (РВИ).

Характерной особенностью исполнения РП электрооборудования является повышенная прочность оболочек, влагостойкость изоляции, защита от попадания воды. К оборудованию РП предъявляют требования высококачественного выполнения изоляции токоведущих частей, более низких температур нагрева электрооборудования и изоляции, помещения нормально искрящих элементов во взрывобезопасные корпуса и некоторые другие.

Рудничное взрывобезопасное электрооборудование должно иметь корпуса повышенной прочности, рассчитанные на внутреннее давление 810,6 кПа (8 атм), широкие фланцы, щели определенных размеров. Все это выполняется для того, чтобы исключить возможность взрыва в рудничной атмосфере в результате взрыва внутри корпуса электродвигателя или какого-либо иного аппарата.

Искробезопасность достигается тем, что параметры искрения (длительность и интенсивность искры и др.), возникающего при нормальной эксплуатации или в ава-

рийных ситуациях, снижаются до уровня, не позволяющего взрыву окружающей среды.

Изготовить электродвигатели постоянного тока в взрывобезопасном исполнении затруднительно, поэтому, они недостаточно надежны, поэтому в установках для подземных работ обычно применяются асинхронные короткозамкнутые двигатели. Исключение составляют электроприводы электровозов и некоторых электрических добывающих комбайнов.

Вентиляторные установки предназначены для поддержания требуемого состава рудничной атмосферы и удаления из шахты вредных примесей, которые образуются при добыче полезных ископаемых, проходке, подготовительных выработок, ведении буровзрывных работ. Размещаются они на поверхности шахты.

Электропривод вентиляторной установки должен работать непрерывно. На мощных газовых шахтах потребляет до 40% всей электроэнергии горнодобывающего предприятия. Поэтому к нему предъявляются требования надежности и экономичности. С целью получения высокого коэффициента мощности для привода главного вентилятора часто применяют синхронный двигатель с батареей конденсаторов статических конденсаторов для повышения cos φ. Это достаточно мощные двигатели (обычно сотни киловатт), работающие при напряжениях 6 кВ и более. Если необходимо регулировать скорость привода двигателя, то применяются асинхронные двигатели с фазным ротором.

Водоотливные установки характеризуются частым включением в работу по мере наполнения приемного сборника. При больших глубинах и водообильных месторождениях их мощность также может составлять несколько тысяч киловатт. Для привода этих установок наиболее часто применяют короткозамкнутые асинхронные двигатели.

Электропривод рудничных подъемных машин мощностью до 1000 кВт в качестве приводных двигателей для подъемных машин применяются асинхронные двигатели с фазным ротором, при больших мощностях — двигатели постоянного тока, включаемые по схеме Г — Д.

Упрощенная принципиальная схема системы электропривода ЭМУ в качестве возбудителя генератора приведена на рис. 5.6. Двигатель переменного тока $M1$ приводит в движение с постоянной скоростью генератор G , от которого

получает питание двигатель постоянного тока $M2$, вращающий барабан подъемной машины. Скорость двигателя $M2$, а следовательно, и барабана подъемной машины, регулируется за счет изменения напряжения генератора G . Это напряжение изменяется в соответствии с требуемым режимом работы за счет изменения напряжения (тока) в обмотках управления $OУ$ электромашиного усилителя $ЭМУ$, питающего обмотку возбуждения генератора $OBГ$. Таких обмоток может быть несколько (на рис. 5.6 показано две обмотки $OУ1$ и $OУ2$). Основной из них является обмотка, напряжение на которой изменяется по программе, задающей требуемый режим разгона, движения с равномерной скоростью и замедления подъемной машины.

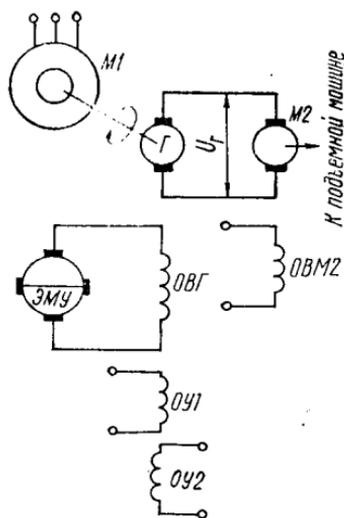


Рис. 5.6. Упрощенная принципиальная схема системы Г—Д с ЭМУ в качестве возбудителя генератора.

Кроме электромашинных усилителей для управления возбуждением генератора могут применяться магнитные усилители или тиристорные преобразователи.

Все перечисленные выше электроприводы являются автоматизированными. Автоматизация электропривода вентиляторных и водоотливных установок заключается, в основном, в автоматическом запуске, защите и сигнализации. В последнее время ставится задача регулирования производительности вентиляторной установки. Одним из путей ее решения является создание регулируемого привода.

Намного сложнее автоматизация подъемных установок. Система автоматизации должна обеспечить запуск и замедление подъемной машины по рассчитанной заранее программе, точный подход подъемного сосуда (скипа или клетки) к конечной точке пути независимо от загрузки подъемного сосуда.

Одним из наиболее сложных по особенностям рабочих режимов и методам автоматизации является электропривод шахтных добычных комбайнов. Мощность комбайна

сравнительно невелика, всего несколько десятков ватт. Однако от его бесперебойной, надежной работы висит производительность отдельных участков шахты в целом. В качестве приводных двигателей применяют короткозамкнутые асинхронные двигатели.

Приводные двигатели добычных комбайнов работают при резко изменяющейся, часто случайной нагрузке, в условиях повышенной влажности и пыли. Довольно часты резкие перегрузки, приводящие к их остановке («опрокидыванию»). Часты бывают многократных повторных запусков под нагрузкой. Это приводит к быстрому старению изоляции и выходу из строя. Срок службы комбайновых двигателей составляет часто лишь несколько месяцев.

В этих условиях особенно важной является автоматизация работы комбайнов. Суть ее сводится к автоматическому регулированию нагрузки привода горного комбайна на заданном расчетном уровне за счет изменения режимов работы. При этом обычно устраняется возможность остановки двигателей, что ведет к повышению срока службы и производительности добычных комбайнов.

Электропривод электровозного и конвейерного транспорта. В подземных выработках применяются электровозы (питающиеся от воздушной сети) и аккумуляторные (от батарей) электровозы. Для привода электровозов используются двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением. Свойства таких двигателей делают их преимущественное применение для тяговых двигателей транспортных устройств, описанных в п. 4.2.

Для привода конвейерных установок обычно используются асинхронные короткозамкнутые двигатели. Одним из основных требований к системе управления электродвигателями конвейерных линий является соблюдение определенной последовательности запуска и остановки двигателей, составляющих линию. При пуске первым включается электропривод конвейера, наиболее удаленного от пункта поступления полезного ископаемого. При остановке первым отключается привод конвейера, расположенного около пункта погрузки. Это необходимо для того, чтобы устранить возможность завалки остатков полезного ископаемого от предыдущих конвейеров. Этот же принцип выдерживается при аварийной остановке одного из электро-

середине конвейерной линии. В этом случае останавливаются все конвейеры, расположенные между отключенным конвейером и пунктом погрузки.

Конвейерные линии — очень важное средство транспорта в горнодобывающей промышленности. В некоторых шахтах для транспортирования полезного ископаемого вообще не используются электровозы, их заменяют ленточные конвейеры. В этом случае внутри шахты существуют многокилометровые линии достаточно мощных ленточных конвейеров. В электроприводах таких конвейеров обычно применяются короткозамкнутые асинхронные двигатели.

Конвейерные линии широко применяются для транспортировки полезного ископаемого и породы также на поверхности шахт и при разработке карьеров. В этом случае для привода могут использоваться асинхронные двигатели с фазным ротором.

Производительность ленточных конвейеров достигает 10 000 ... 20 000 м³/ч при длине конвейерной линии до 2000 м. Мощность одного приводного двигателя может составлять около 500 кВт. При этом в конвейерной линии может устанавливаться несколько приводных двигателей. Например, для привода ленточного конвейера КЛП-850 производительностью 750 т/ч применяются три электродвигателя мощностью по 500 кВт каждый при длине конвейера 850 м.

Автоматизация электроприводов горной промышленности. Современные электроприводы всех основных установок горной промышленности являются автоматизированными, однако характер их автоматизации самый различный.

Практически все основные установки горных предприятий оборудованы устройствами автоматического контроля, сигнализации, защиты.

На шахтах широко применяется защита электроприводов от коротких замыканий и перегрузок (токовая защита при помощи плавких предохранителей, максимальных и тепловых реле), сигнализация о перегреве подшипников мощных установок (вентиляторных, водоотливных, подъемных).

Сигнализация обычно выполняется двух видов — оптическая и акустическая. Например, при перегреве подшипников на световом табло обычно загорается красная лампа и включается сирена или звонок.

Более сложные задачи решаются системами автоматического управления. Применяемые в горной промышленности САУ в основном являются обыкновенными системами с разомкнутой или замкнутой структурой.

Широкое применение получили разомкнутые системы автоматического пуска асинхронных двигателей с частотным регулированием ротором в функции тока с дополнительной защитой от короткого замыкания. Задача такой системы заключается в том, чтобы после подачи напряжения на статор двигателя при нажатии пусковой кнопки оператором или за счет действия каким-либо датчиком по мере разгона двигателя ограничивать сопротивление в цепи ротора. В большинстве случаев роторные сопротивления выключаются ступенчато. Момент переключения определяется минимальным значением тока. Время работы двигателя на отдельных этапах зависит от величины нагрузки.

В горной промышленности получили распространение также замкнутые САУ — системы автоматического регулирования и программного регулирования. Применяются также системы автоматического регулирования скорости загрузки угледобывающих машин и роторных двигателей. Задача таких систем состоит в том, чтобы обеспечить работу машины с постоянной нагрузкой, равнозначной номинальному значению. В таком режиме достигается максимальная производительность машины и устраняются перегрузки, за счет чего повышается срок службы и другие экономические показатели.

Первопричиной изменения нагрузки угледобывающих машин и экскаваторов обычно является изменение скорости вращения ротора. Регулирование скорости вращения ротора осуществляется за счет изменения скорости перемещения добывающей машины или перемещения роторного колеса экскаватора. Регулирование скорости вращения ротора осуществляется путем изменения скорости вращения исполнительного двигателя добычной машины или роторного колеса экскаватора.

Опыт эксплуатации автоматизированных систем управления горных машин показывает, что по сравнению с ручным управлением технически возможная производительность машины увеличивается на 25 ... 30%.

Характерным примером систем программного

рования в горной промышленности является управление подъемной машиной на заключительном этапе движения.

При проектировании подъемной установки рассчитывается диаграмма скорости U (тахограмма) подъемной машины. На рис. 5.7 показана трехпериодная тахограмма, на которой обозначено время разгона t_1 , равномерного хода t_2 и замедления t_3 . Она определяет требуемые величины ускорения и замедления, производительность подъемной установки.

Обычно разгон осуществляется при помощи разомкнутых схем автоматического управления. При равномерном ходе, как правило, не требуется регулирования режима работы машины. Наиболее ответственным является заключительный период, так как в результате отклонения действительной скорости от расчетного значения подъемный сосуд может подойти к конечной точке пути с излишне большой скоростью. Это, в свою очередь, может вызвать повреждение посадочных устройств, перенапряжение механических узлов подъемной установки. Уменьшение скорости относительно расчетной ведет к увеличению длительности t_3 , а следовательно, общего времени цикла движения подъемной машины $t_1 + t_2 + t_3$, и в результате — к снижению ее производительности.

Для обеспечения расчетного графика движения на подъемных установках имеются связанные с валом подъемной машины программные диски. Профиль диска представляет заданную программу изменения скорости в зависимости от пути, проходимого подъемным сосудом. Иначе говоря, каждая точка профильного диска соответствует требуемой скорости подъемной машины в данной точке ствола. Диск поворачивается по мере движения подъемной машины, совершая один или два оборота за время подъемного цикла. При вращении он воздействует на движок потенциометра или ротор специальной электрической машины (сельсина-датчика), на выходе которых появляется напряжение, пропорциональное требуемой скорости.

В системе программного регулирования сравнивается действительная скорость подъемной машины с заданной

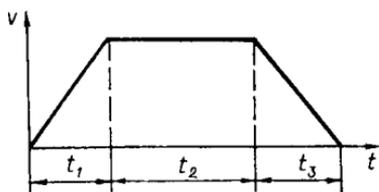


Рис. 5.7. Тахограмма работы подъемной установки.

и в зависимости от величины рассогласования, а величина тормозного усилия таким образом приводит действительную скорость к заданной.

Рассмотренные системы автоматического управления имеют начальную информацию, достаточную для регулирования и дальнейшего функционирования, т. е. являются обыкновенными САУ.

В качестве примера кибернетических систем приведем САУ угледобывающей машины, работающей по так называемому максимальному варианту. Нагрузки угледобывающей машины происходят из-за изменения скорости перемещения машины, ее выносы, так и скорости вращения исполнительных органов. Исследования показали, что оптимальное соотношение этих скоростей, исходя из критерия минимального расхода электрической энергии на 1 т добытого угля, является постоянной величиной, а зависит от характера работы угля. Поэтому настройка системы должна изменяться в процессе работы на основе получения соответствующей информации, т. е. система должна быть самонастраиваемой.

Подобным образом может действовать также и управление роторного экскаватора, регулирование режима работы которого осуществляется при оптимальном соотношении скорости вращения роторного колеса и перемещения рабочего органа.

5.4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

Одним из оригинальных современных применений электропривода на транспорте является электрический автомобиль. Он представляет новый вид безвредного транспорта, не отравляющего окружающую среду вредными газами. В электрическом автомобиле нет муфты сцепления, коробки скоростей, что упрощает управление и повышает надежность, снижает расход специальных смазочных материалов и эксплуатационные расходы. В электрическом автомобиле уменьшен износ механических частей и устройств, поскольку используются тормозные свойства электропривода.

В современных мощных грузовиках ходовая часть (включая муфту сцепления, коробку скоростей)

данный вал, дифференциал и полуоси) больших размеров, значительного веса, для ее изготовления необходимо большое количество специальных сталей. Для снижения веса автомобиля и его металлоемкости, а также повышения надежности были применены мотор-колеса. Они представляют собой колеса с вмонтированными во внутрь электроприводами, получающими питание от регулируемого генератора, приводимого двигателем автомобиля. Механическая трансмиссия заменена электрической.

В Канаде создан грузовой автомобиль грузоподъемностью 600 т, имеющий двигатель мощностью 2206,5 кВт (3000 л. с.). Этот автогигант движется на 10 колесах, имеющих диаметр 3,6 м. Каждое колесо имеет индивидуальный электропривод. Все электроприводы получают питание от управляемого генератора, приводимого в движение двигателем автомобиля. В этом уникальном автомобиле отсутствуют муфта сцепления, коробка скоростей и механическая трансмиссия. Электропривод повысил надежность работы ходовой части, упростил систему управления, повысил к. п. д. автомобиля и снизил эксплуатационные расходы. Весь уход за электроприводами свелся к замене смазки в подшипниках через указанное в паспорте число часов работы.

Применение электропривода с широким диапазоном регулирования скорости (1000 ... 2000) позволило исключить на металлорежущих станках коробки подач и получить множество скоростей при чисто электрическом регулировании с одновременным снижением металлоемкости станка, его стоимости и повышения эксплуатационных показателей.

В результате применения электроприводов с синхронным вращением механически не связанных валов удалось ликвидировать сложные и громоздкие механические трансмиссии в кранах козлового типа большой длины, а также создать шлюзовые устройства, судоподъемники и другие аналогичные устройства с упрощенной механической частью вследствие замены трансмиссии обычным трехжильным кабелем.

В электроприводах обжимных прокатных станков с одним двигателем применялись шестеренные клетки, которые представляли собой мощные металлоемкие конструкции высотой 10 м с большим количеством масла, циркулировавшего в сложной системе смазки. Применение

индивидуального электропривода валков ликов шестеренные клетки в таких станах, повысило и снизило капиталовложения при сооружении с крыло пути повышения их эффективности.

Замена гидропривода электроприводом в управлении самолетами снизило их вес, что с увеличением полезной нагрузки самолета, уменьшилась пожароопасность, поскольку масса горючим веществом, и упростилось дублирование резервных каналов управления.

В современных установках противоздушный локатор с помощью следящих электроприводов та и угла места точно следит за летящей целью и передает электрические сигналы управления электро ракетных установок, которые обеспечивают ракеты на цель. Только на основе электроприводов обеспечивена такая высокая точность и надежность.

Чтобы расширить представление о значимости штабах применения электроприводов, рассмотрим несколько примеров.

Хорошо известно, какое огромное значение жизни имеет листовая сталь. Она применяется в автомобилестроении для изготовления кузовов легковых автомобилей, кабин грузовиков, тракторов, строит других машин. Стальной лист в больших количествах требуется всеми отраслями машиностроения, используются холодильники, газовые плиты, стиральные машины и другие бытовые приборы, огромное количество стального листа используется для изготовления консервной тары. Потребность в стальном листе различных толщин и разных марок непрерывно возрастает.

Стальной лист производится на станах холодной прокатки. Схема устройства современного непрерывного прокатного стана холодной прокатки показана на рис. 5.8. В клетях стана происходит непрерывная заготовки до требуемой толщины. Полоса, выходящая из стана, может иметь толщину от 0,3 до 2,5 мм.

Производительность современного стана составляет 1,8 млн. т/год, максимальная скорость прокатки соответствует движению поезда со скоростью 126 км/ч, масса рулона заготовки 35 т. После прокатки рулона стан не останавливается, концы выходящего рулона привариваются к началу нового рулона, и прокатка идет непрерывно. Готовая полоса также

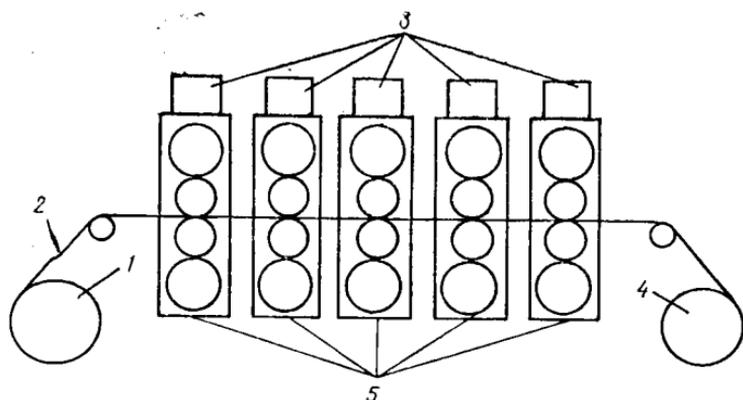


Рис. 5.8. Схема устройства пятиклетьевого стана холодной прокатки:
 1 — разматыватель; 2 — прокатываемый лист; 3 — нажимные устройства;
 4 — моталка; 5 — клетки.

вается на рулоны и обрезается после намотки летучими ножницами без остановки стана.

Для выполнения такого огромного объема работы, определяемого технологическим процессом холодной прокатки стали, требуются соответствующие мощности электроприводов. Например, валки каждой клетки приводятся четырьмя электродвигателями мощностью по 2700 кВт, т. е. общая мощность привода клетки составляет 10 800 кВт; электропривод моталки, которая наматывает рулоны готовой полосы, имеет мощность 3750 кВт; суммарная мощность только основных электроприводов стана составляет 57 750 кВт. Если еще учесть мощности электроприводов нажимных устройств, разматывателя и других вспомогательных механизмов, обслуживающих стан, то суммарная мощность всех его электроприводов превысит 60 000 кВт.

Толщина полосы при прокатке от клетки к клетке уменьшается, поэтому скорость прокатки возрастает. Следовательно, электроприводы стана должны быть регулируемые и работать с разными скоростями. Для выполнения этих требований применяются двигатели постоянного тока с независимым возбуждением, якорные цепи которых получают питание от тиристорных преобразователей.

Выпущенная станом стальная полоса должна удовлетворять требованиям ГОСТа, что обеспечивается применением сложных устройств автоматизации, объединенных в управляющий вычислительный комплекс.

В современном машиностроении видное место занимают продольно-строгальные станки. Существуют в СССР станки такого типа обрабатывают блоки массой несколько десятков тонн. В этом станке резцы неподвижны в суппортах, а обрабатываемая деталь совершает возвратно-поступательное движение по столу, на котором она закрепляется. При работе станка производится строгание, а при обратном ходе деталь перемещается в исходное положение. Скорость резания обусловлена параметрами технологического процесса и стойкостью резцов, то скорость обратного хода не связана с требованиями технологии. Зависит от длины станка и динамических показателей электропривода стола.

Электропривод стола работает в динамическом режиме, что обусловлено реверсированием стола и изменением скорости и скорости холостого хода. Обратное движение. Сокращение времени динамических режимов электропривода стола продольно-строгального станка приводит к повышению эффективности его работы.

Общий вид продольно-строгального станка показан на рис. 5.9. Наибольшая масса детали, обрабатываемой на этом станке составляет 20 т, длина хода стола — 19660 мм, наибольшее усилие резания — 150 кН. Скорость движения стола может плавно меняться от 6 до 75 м/мин, а скорость холостого хода от 12 до 75 м/мин. Масса стола — 13 т. Система управления обеспечивает

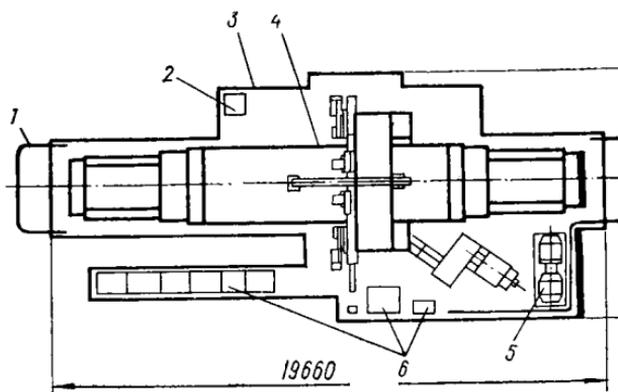


Рис. 5.9. Общий вид продольно-строгального станка: 1 — ограждение; 2 — бак смазки станины; 3 — контур фундамента станка; 4 — суппорт; 5 — преобразовательный агрегат; 6 — шкафы электрического управления.

ускорением при обработке деталей с проемами. Для электропривода стола применяется двигатель постоянного тока на напряжении 440 В, номинальной мощностью 125 кВт. Питается электродвигатель от управляемого тиристорного преобразователя. Управление электроприводами станка осуществляется с пульта посредством командоаппаратов, на нем также находятся измерительные приборы, контролирующие работу станка.

Электропривод находит также применение при освоении космического пространства. В ноябре 1970 г. на Луну была доставлена советская передвижная лаборатория «Луноход-1», которая проработала по октябрь 1971 г., пройдя по лунной поверхности в различных направлениях 10 540 м и передала на Землю много ценной информации. Эта лаборатория была смонтирована на самоходном шасси, колеса которого приводились в движение индивидуальными электроприводами, получавшими питание от бортовых аккумуляторных батарей, заряжавшихся от преобразователей солнечной энергии.

На электроприводы передвижной лаборатории «Луноход-1» возлагалась задача перемещения уникального оборудования по неизведанной лунной поверхности и исключения аварийных ситуаций в процессе движения. Электропривод должен был неподвижно фиксировать лабораторию в заданных координатах, где проводились исследования. Управляющие команды электроприводу передавались из центра управления луноходом.

Чтобы оценить универсальность электропривода лунной передвижной лаборатории, нужно иметь в виду, что луноход мог двигаться с двумя рабочими скоростями в зависимости от характера лунной поверхности. Он мог изменять направление движения по команде из центра управления, поворачиваться на любой угол, находясь в неподвижном состоянии. На уклонах электроприводы переключались на режим динамического торможения, а при остановках действовали дисковые тормоза с электромагнитным управлением. Электропривод не был чувствителен к химическому составу окружающей среды и другим ее физическим параметрам.

Приведенный пример подтверждает широкие перспективы использования электроприводов при освоении человеком космического пространства.

Советские ледоколы «Арктика» и «Сибирь» являются достижением отечественной науки и атомного судострое-

ния. Оба ледокола являются электроходами, при этом гребные винты вращаются с помощью электродвигателей.

Работа электроприводов гребной установки осуществляется с изменениями скорости вращения в процессе работы с большими нагрузками и перегрузками при работе в сложной ледовой обстановке, с необходимостью реверсирования винтов и повторного движения. Такие электроприводы характеризуются большими мощностями, высокой маневренностью и большими запасными способностями.

Ледокол «Арктика», впервые в истории человечества достигший Северного полюса в 1977 г., получает электрическую энергию для гребной установки от двух турбин, имеющих суммарную мощность 55 (75 000 л. с.). Эти турбины вращают синхронные фазные генераторы, которые подключены к мощным полупроводниковым преобразователям, от которых получают питание три электропривода, вращающие гребные винты. Изменение скорости гребных винтов задается посредством командоаппарата с главного поста управления ледокола путем изменения напряжения на якорях гребных электродвигателей. Реверсирование электроприводов гребных винтов также выполняется по команде с главного поста управления ледоколом. Оно достигается посредством изменения направления тока в обмотках независимых электродвигателей гребных винтов. Для управления электроприводами применены бесконтактные тиристоры, характеризующиеся высокой надежностью.

Глава 6

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

6.1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В РАЗВИТИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Широкое применение электрической энергии в различных областях техники, в сельском хозяйстве и быту является одним из основных направлений технического прогресса XX в. Однако в процессе построения «Электрического моста» выявляются не только сильные, но и слабые стороны.

использования этой формы энергии. В распоряжении человечества нет природных запасов электроэнергии в какой-либо форме. Использование природных источников электрической энергии — атмосферного электричества и геотоков — пока не рассматривается как реальная научная, а тем более техническая задача. Мало того, полученную тем или иным путем электрическую энергию приходится тут же использовать, потому что накопление электрической энергии в чистом виде в каком-либо значительном количестве пока недоступно человечеству.

Таким образом, принципиальная схема современной электроэнергетики состоит из следующих связанных элементов — генераторная установка (электростанция), на которой один из доступных видов энергии (химической, тепловой, механической, лучистой) преобразуется в электрическую; линия передачи, связывающая генераторную установку с потребителем, и, наконец, потребитель, который снова, как правило, использует возможность легкого преобразования электрической энергии в какую-либо иную форму, например, в механическую, тепловую, лучистую, химическую и т. д. Как видно, в этой схеме электричество выполняет роль передаточного агента. Поэтому иногда электрическую энергию называют *транспортной формой энергии*. Это настолько удобная для передачи, настолько гибкая в преобразованиях форма энергии, что и в дальнейшем есть все основания предполагать, что применение электроэнергии во всех областях техники и ее значение для человечества будет расти.

Электрическая энергия в настоящее время передается главным образом по проводам кабельных и воздушных линий. Такой способ передачи является наиболее простым, однако по мере роста протяженности линий и повышения их напряжения стоимость линий передачи увеличивается и эффективность использования электроэнергии снижается. Кроме того, линии сверхвысокого напряжения оказывают отрицательное влияние на экологический режим районов, по которым они проходят. Наконец, на сооружение линий электропередачи расходуется огромное количество цветных металлов — меди и алюминия. Поэтому большой интерес вызывают перспективные исследования по созданию новых методов передачи электрической энергии на расстояние.

Один из них, положенный в основу технических проектов, предусматривает использование сверхпроводящих

кабелей. Несмотря на необходимость значительных затрат на холодильные установки, подобные линии могут оказаться лучше существующих по экономическим показателям. Образцы сверхпроводящих уже созданы советскими учеными и проходят испытание.

Второе направление исследований предполагает принципиально новый метод — передачу энергии без проводов. Еще на заре радиотехники время от времени появлялись сенсационные сообщения о решении проблемы. При этом авторов сенсаций особенно привлекала мысль использовать достижения науки в военных целях. «Лучи смерти» — вот что вызывало восторг падких на сенсацию газетчиков. Однако необходимость концентрации энергии, преобразование колоссальных мощностей в энергию сверхвысоких частот на существующем в то время уровне техники было невозможно. Развитие радиолокационной техники и ее элементов, появление квантово-оптических генераторов — лазеров, открывает новые технические возможности. Рассматривается возможность передачи энергии и информации по волоконно-оптическим каналам на большое расстояние, так и непосредственно через атмосферу. Особый интерес представляет второе направление, поскольку оно не требует капитальных затрат на линию передачи. В настоящее время осуществлена экспериментальная передача энергии этим способом на большое расстояние с полным к. п. д. передачи 40%. Однако уже сегодня рассматривается возможность создания солнечных электростанций-спутников в космосе и передачи энергии на Землю с помощью микроволновых антенн.

Сегодня трудно представить себе все изменения, которые может внести передача энергии без проводов в жизнь нашего мира.

Наряду с этим разрабатываются проекты так называемой «водородной энергетики», в которой в качестве топлива и источника энергии используется водород. Привлекательность этой идеи заключается в возможности аккумулирования энергии, простоте использования водорода для «чистых» двигателей, не создающих загрязнения окружающей среды. Однако внедрение водородной энергетики в чистом виде невозможно. Для широкой пространственной системы электроприводов нецелесообразна передача энергии, следовательно, все равно пот

преобразовательные устройства для получения электроэнергии.

Первостепенное значение имеет и развитие самих производителей электроэнергии — генераторных установок. Энергетика должна предоставить человечеству достаточное и все возрастающее количество электроэнергии. В связи с этим совершенствуются как традиционные методы получения электроэнергии, так и ищутся новые пути.

В условиях топливно-энергетического кризиса все большее значение приобретает экономное расходование ископаемого топлива, запасы которого истощаются. Однако сам принцип получения электроэнергии идет по цепочке химическая энергия топлива — тепло — механическая энергия — электрическая энергия ставит пределы для максимального к. п. д. тепловых станций. Идеальный к. п. д. любой тепловой машины определяется отношением

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

где T_1 и T_2 — начальная и конечная температура рабочего тела (пара) в градусах Кельвина.

Верхний температурный предел определяется прочностью материалов котла, трубопроводов и самой турбины при нагреве. Для существующих материалов предельной температурой при высоких давлениях (порядка 300 атмосфер) является 750 ... 800 К. Таким образом, достижимый предел к. п. д. только одной ступени преобразования (тепловая энергия — механическая) не превышает 50%, а полный к. п. д. тепловой станции, выполненной по традиционной схеме, близок к 40%.

Поэтому в настоящее время ведутся широкие исследования как по улучшению схем тепловых электростанций, так и по разработке новых источников электрической энергии.

Существенного повышения эффективности тепловых станций можно добиться введением в схему преобразования магнитогидродинамических (МГД) генераторов (рис. 6.1). Рабочим телом в них являются раскаленные продукты сгорания топлива при начальной температуре 2200 ... 2300°C. При таких температурах газ ионизирован и представляет проводящую среду (низкотемпературную

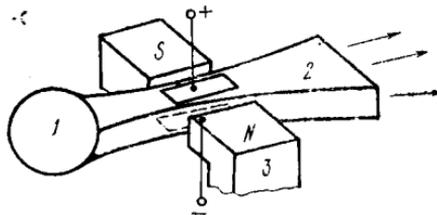


Рис. 6.1. Устройство МГД-генератора:
1 — камера сгорания; 2 — рабочий канал;
3 — магнитная система.

плазму). При
ждении газа че
ширяющееся с
котором созда
ное магнитное
нем наводится
Электрическая
может быть с
специальных
тов, вмонтиров
стенки сопла.

тавший в этом генераторе, расширившийся и ох
ный, газ используется для нагрева парового котла
ной тепловой станции. Расчеты показывают, что
няя подобную схему, можно повысить к. п. д.
станции до 50 ... 55 %.

В нашей стране создана и работает магнито
намическая установка мощностью 25 000 кВт, ра
ваются проекты более мощных промышленных ст

Согласно планам развития энергетики в XI п
и до конца XX столетия все большее внимание у
развитию атомной энергетики. Современные
электростанции, использующие энергию расщеп
ся элементов, несовершенны.

Даже после усовершенствования атомных
остаются недостатки — наличие радиоактивных
ограниченность запасов расщепляющихся элем
значит, ядерного горючего, сравнительно низкой
Поэтому при перспективном планировании особо
ние уделяют разработке установок термоядерн
теза.

Согласно прогнозам начало промышленного
зования термоядерного синтеза намечается толь
це нашего века.

Большой вклад в борьбу за овладение управ
термоядерной реакцией внесли советские ученые
ряд принципиально новых установок был созда
скими физиками. Такие установки, как «Токамак
зуются в лабораториях всего мира. На первом э
обходимо получить и удержать в течение долей
плотную плазму на основе тяжелого водорода
рия), нагретую до десятков миллионов градус
шения этой задачи используются все новейшие
ния науки — сверхсильные магнитные поля, созд

сверхпроводящими магнитами, концентрация лучей батареями лазеров и т. п.

Вопрос о непосредственном получении энергии в таких установках, ее съеме, об эффективности установок предстоит еще решать.

Большой прогресс достигнут также в области малой энергетики (автономных установках сравнительно небольшой мощности) в связи с разработкой электрохимических генераторов, называемых топливными элементами. История электротехники начиналась с электрохимического элемента — вольтова столба. Сегодня, на новом уровне, мысли ученых заняты созданием высокоэффективного преобразователя химической энергии в электрическую без промежуточных этапов. В традиционных гальванических элементах получение электрической энергии связано со «срабатыванием» электродов. В существующих топливных элементах рабочими телами являются газы или жидкости, которые непрерывно подаются в элемент. Сам электрохимический процесс окисления проходит с обязательным применением катализаторов, иногда при повышенной температуре. В качестве «топлива» используются водород или углеводороды — пропан, гидразин, метанол. Окислителем является кислород. В разработанных элементах при мощностях в несколько десятков киловатт достигнут к. п. д. 45 ... 50%, т. е. выше, чем у самых совершенных тепловых электростанций. Подобные элементы используются на некоторых американских спутниках в качестве бортового источника энергии.

Высокий к. п. д., отсутствие вредных влияний на окружающую среду (продукты реакции — вода и углекислый газ), а также движущихся частей, и, следовательно, повышенная надежность и отсутствие шума являются важными достоинствами топливных элементов. Во многих прогнозах им уделяется исключительно важное место, особенно при рассмотрении перспектив развития транспорта. Кроме того, топливный элемент как бы специально создан для использования в системе «водородной» энергетики. Проекты использования водорода для энергетических целей основаны на широком использовании атомной энергии для получения водорода как носителя и концентрата энергии. Для обратного преобразования могут быть использованы топливные элементы.

Однако на пути использования всех новых технических решений, таких как магнитогидродинамические гене-

раторы, топливные элементы, не говоря уже о термических установках, лежат большие технические трудности. Высокие требования к чистоте топлива, необходимость создания новых материалов и конструкций — все это медлит внедрение даже апробированных решений. Главная трудность должен преодолеть инженер, причем не в ближайшем будущем.

Одно из направлений научных исследований — разработка новых технических разработок в области энергетики сейчас привлекает особое внимание. Речь идет об использовании возобновляемых источников энергии. В качестве таких источников рассматривается солнечная энергия, кинетическая энергия ветра, волн, температурные перепады в морях и океанах, энергия Земли, в первую очередь тепловая энергия недр. Особенность этих видов энергии — малая плотность, поэтому для получения значительных мощностей требуется создавать воспринимающие системы больших габаритов. Вопрос заключается в том, можно ли создавать дешевые, простые и надежные конструкции, способные использовать эти потоки энергии.

Развитие электростанций и в дальнейшем будет основываться на использовании электромеханических преобразователей энергии, электромашинных генераторов. К этому перспективны развитие электроэнергетики и связанные с созданием более мощных и экономичных генераторов.

Третье звено энергосистем, ради которого они существуют, это потребители электроэнергии. Существенная часть среди них составляют электроприводы, использующие электрические двигатели различных типов. Вместе с этим растет роль электротехнологии, т. е. процессов, в которых используется не механическое воздействие на объект обработки, а действие электрических и магнитных полей, их силовых, химических и тепловых эффектов.

Развиваются и разрабатываются все новые химические процессы: наряду с традиционными электрохимическими ваннами (гальванопластика и гальваностегия) все шире применяются установки для анодной обработки, электроэрозионные станки, штампы, в которых используется электрогидравлический эффект и другие явления. Дальнейшее развитие получают новые виды электросварки как электродуговой, так и лазерной, с помощью мощных электронных

6.2. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Основные современные тенденции в развитии автоматизированного электропривода можно свести к следующему:

дальнейшее повышение мощности электрических машин, электроприводов и их технико-экономических показателей;

разработка плавнорегулируемых электроприводов переменного и постоянного тока на основе полупроводниковых элементов;

повышение точности, надежности и других показателей качества работы установок и их производительности на основе применения более совершенных систем автоматического управления;

все более глубокое проникновение в суть физических явлений, возникающих при работе сложных электроприводов;

усложнение задач, решаемых автоматизированным электроприводом, в связи с широким внедрением в производство современных устройств автоматического управления и технической кибернетики, ЭВМ и других современных технических средств;

широкое применение в промышленности автоматизированных линий, основанных на применении промышленных роботов и манипуляторов;

применение автоматизированного электропривода как подсистемы, входящей в автоматизированную систему управления некоторым технологическим процессом (АСУ-ТП);

разработка автономных электроприводов и соответствующих систем управления ими.

Рассмотрим кратко некоторые основные особенности указанных выше тенденций.

Развитие современной технологии в самых различных отраслях производства связано с непрерывным ростом производительности установок, их мощности. Соответствующим образом возрастают мощности применяемых электрических машин и электроприводов переменного и постоянного тока.

Характерным примером может служить сверхмощный шагающий экскаватор (вместимость ковша 125 м³, длина

стрелы 125 м), мощность сетевого приводного двигателя которого составляет более 28 тыс. кВт (см. гл. 1).

В металлургической промышленности при использовании приводных двигателей на прокатных станах с мощностью свыше 6000 кВт.

На современных глубоких шахтах (глубина до 2000 м) при грузоподъемности подъемных сооружений до 100 т и скоростях движения до 50 м/с мощность приводных двигателей превышает 10 тыс. кВт.

Мощные приводные двигатели установлены на современных сверхмощных танкерах и ледоколах. Например, мощность установок, питающих приводные двигатели гребного вала атомного ледокола «Арктика», составляет 55,16 МВт (75 000 л. с.).

Рост мощностей двигателей и усложнение требований к электроприводам все более остро ставит вопрос о повышении их технико-экономических показателей, о повышении их регулировочных характеристик, совершенствовании технических средств и АСУ.

Возникает целый комплекс проблем, касающийся не только вопросов непосредственной разработки и изготовления электрической машины, но и систем управления ею.

Одной из важнейших задач является создание регулируемых и нерегулируемых приводов.

Длительное время основной системой электроприводов постоянного тока различной мощности, обеспечивающей плавное регулирование частоты вращения двигателя в широком диапазоне, была система генератор — двигатель. Схема системы и ее работа рассмотрены в п. 5.1. Основным недостатком этой системы заключается в том, что для ее работы требуется три электрических машины ($M1$, Γ , $M2$, см. рис. 5.8), мощность каждой из которых примерно равна мощности двигателя $M2$, непосредственно приводящего в движение рабочую машину. Поэтому система $\Gamma — M2$ является сравнительно громоздкой, дорогостоящей, имеет низкий к. п. д.

В настоящее время существует вполне определенная тенденция заменять, где это возможно, весь генераторный комплекс (машины $M1$, Γ , ЭМУ) статическими преобразователями проводниковыми устройствами, для этой цели требуется создание мощных, надежных полупроводниковых устройств.

Хотя за последние годы и повысились мощно-

дежность, уменьшилась стоимость полупроводниковых приборов, все же для установок с мощным высоковольтным приводом по системе Г — Д схемы силовых полупроводниковых преобразователей оказываются пока что сложными, дорогостоящими и главное — недостаточно надежными. Поэтому в настоящее время в промышленности еще широко распространены системы Г — Д. Однако по мере повышения качества полупроводниковых преобразователей и их мощности следует ожидать замены генераторов полупроводниковыми преобразователями и в мощных электроприводах.

На установках небольшой и средней мощности указанная тенденция уже в настоящее время становится преобладающей. Следует указать, что полупроводниковые преобразователи находят применение и в мощных системах Г — Д в основном лишь для возбуждения генератора вместо ЭМУ или генератора-возбудителя.

Интенсивные работы ведутся также по созданию плавнорегулируемых электроприводов переменного тока с асинхронными короткозамкнутыми двигателями на основе применения регулируемых полупроводниковых преобразователей частоты. В настоящее время эти преобразователи еще довольно дороги и нуждаются в дальнейшем усовершенствовании. Мощность их сравнительно невелика.

Все более жесткие требования предъявляются промышленностью в отношении качества управления. Ручное управление имеет ряд серьезных недостатков. Одним из основных является невысокая точность работы оператора, что может привести к удлинению рабочего цикла, снижению производительности, росту брака. Это особенно проявляется к концу смены в результате утомляемости оператора.

Автоматическое управление в первую очередь предусматривает устранение недостатков ручного управления. Однако функции современных САУ часто выходят за рамки этих задач.

В промышленности широко применяют системы программного регулирования. Программа регулирования часто рассчитывается заранее и соответствует номинальному режиму работы установки. Она может быть задана в виде определенного профиля копира либо при помощи перфоленты, или другого программносителя (станки с программным управлением, подъемно-транспортные уста-

новки с программированным замедлением и др. Система автоматического управления следит за соотношением действительного режима расчетному и при нарушении рассогласования стремится его устранить.

Существенное повышение точности САУ достигнуто благодаря применению комбинированных систем управления. Их особенностью является изменение регулируемой величины не только в зависимости от отклонения ее от заданного значения, но и в функции его возмущения. Например, для подъемно-транспортных установок такие команды могут подаваться в зависимости от загрузки подъемного сосуда.

Более сложные задачи решаются при помощи нечетических самонастраивающихся и игровых систем.

Одним из возможных способов стабилизации скорости угледобывающих машин является применение самонастраивающейся системы. Принципом работы основан на том, что мощность привода угледобывающей машины можно регулировать изменением скорости движения машины вдоль забоя (скорость подачи топлива вращения исполнительного органа (скорости вращения)). Нагрузка привода и потребление электроэнергии на тонну добытого полезного ископаемого зависят от отношения указанных скоростей.

Для конкретных характеристик полезного ископаемого существует наиболее выгодное соотношение скорости подачи и резания, при котором удельный расход энергии минимален. Однако при изменении параметров характеристик полезного ископаемого численное значение экстремума функции удельного расхода энергии будет изменяться. В этом случае САУ, в зависимости от изменения характеристик полезного ископаемого таким образом изменять скорость подачи и резания, с одной стороны, обеспечить поддержание скорости электропривода на заданном уровне, а с другой — поддерживать наиболее выгодное (оптимальное) соотношение скоростей подачи и резания, обеспечивающее минимальный (в данном случае минимальный) расход энергии. Аналогичная задача возникает при автоматическом управлении мощными роторными экскаваторами и рядом других объектов.

Для мощных машин, обладающих большими инерционными массами (экскаваторы, подъемные установки, станки, турбины и др.), огромное значение имеют инерционные режимы — режимы ускорения и замедления.

установки. В практике известны случаи деформации (скручивания) валов подъемных машин диаметром до 700 мм, выхода из строя турбин в результате вибраций и другие аварии, возникшие в результате упругих колебаний в мощных электромеханических установках.

Мощные установки часто представляют собой системы со многими массами, соединенными между собой упругими связями, физические процессы в таких системах весьма сложны. Рассматривая такие системы как одномассовые, без учета упругих связей внутри установки между отдельными ее элементами, невозможно выяснить не только количественную, но и качественную сторону явления, возникающих при динамических режимах. Это может привести к недопустимым перегрузкам отдельных элементов, к снижению их эксплуатационной надежности, «накоплению усталости» и в результате к авариям, простоям, снижению производительности.

Улучшение динамических режимов работы мощных установок может быть достигнуто за счет создания соответствующих систем электропривода и автоматизации режимов его работы. Все более широкое применение ЭВМ позволяет решать достаточно сложные задачи исследования и разработки мощных многомассовых установок и соответствующих систем автоматизированного электропривода.

Этим вопросам в последнее время уделяется большое внимание. Одним из примеров, характеризующих данное направление, могут служить работы по исследованию предложенного в Киевском политехническом институте режима одновременного торможения мощных подъемных установок механическим и электродинамическим тормозами, разработка двухканальных САУ, обеспечивающих оптимизацию режима замедления относительно величины упругих усилий.

На рис. 6.2 показана упрощенная схема подъемно-транспортной установки.

Если тормозить подъемную установку только моментом механического тормоза M_T , прикладываемого к тормозным шкивам барабана B , то момент упругости M_y в элементах силовой транс-

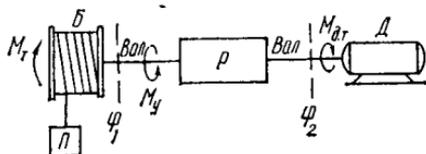


Рис. 6.2. Упрощенная схема подъемно-транспортной установки.

миссии (вал, редуктор Р) будет пропорциональна скорости трансмиссии c и разности углов φ_1 и φ_2 «сечений» трансмиссии в соответствующих ее точках:

$$M_y = c(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Если вместо одного тормозного момента механического тормоза, прикладываемого к барабану дополнительный, действующий в том же направлении тормозной момент $M_{дт}$ за счет привода двигателя ботающего в режиме динамического торможения

результатирующем тормозном моменте $M_{\Sigma} = M_{\Sigma}^{i-1} + M_{дт}$ ном по величине действовавшему до этого момент механического тормоза M_T , величина упругого момента значительно меньше. Это объясняется тем, что углы φ_1 и φ_2 упругой закрутки сечений будут значительно меньше, чем при действии одного момента механического тормоза $M_T = M_{\Sigma} = M_T + M_{дт}$, приложенного к барабану Б.

В результате приложения тормозных моментов механического тормоза и электродинамического тормоза по краям силовой трансмиссии и соответствующей разровке тормозных усилий при помощи САУ возможно обеспечить выполнение заданного (или иного) режима замедления подъемного сосуда при минимальном значении упругих усилий в силовой трансмиссии. Это позволяет повысить эксплуатационную надежность редуктора, механических элементов трансмиссии и установки в целом.

На рис. 6.3 показана упрощенная функциональная схема САУ мощной подъемной установки при одновременном действии двух тормозных устройств: механического тормоза ТР и электродинамического ДТ. Оптимальное распределение тормозных усилий между тормозными устройствами осуществляет оптимизатор ОПТ. Механическим тормозом управляет электропневматический ЭПР, для питания электродинамического тормоза используется тиристорный источник постоянного тока.

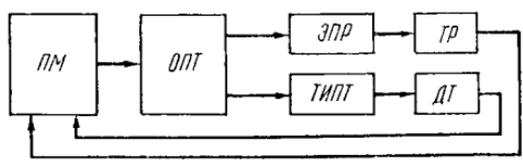


Рис. 6.3. Функциональная схема САУ при одновременном действии двух тормозных устройств

Роль электродинамического тормоза выполняет сам двигатель подъемной машины *ПМ*. В качестве оптимизатора возможно применение ЭВМ, решающей задачу выбора оптимального соотношения тормозных моментов.

Изложенные выше некоторые особенности работы мощных промышленных установок говорят о необходимости решения многих задач в тесной взаимосвязи их механических и электротехнических свойств.

Многогранные задачи исследования и промышленного применения мощных динамических объектов, часто требующих оптимизации режимов их работы, учета влияния упругих связей, решения других сложных вопросов в настоящее время не могут быть выполнены без применения ЭВМ, современных методов теории автоматического управления, технической кибернетики. Рассмотренные примеры показывают некоторые направления их применения при автоматизации отдельных промышленных установок.

Весьма перспективными являются тенденции все более широкого применения в производстве промышленных роботов и манипуляторов. Их разработка и исследования положили начало развитию нового научно-технического направления — *робототехники*.

Одной из тенденций современного массового производства является все большее усложнение операций, выполняемых машинами, и упрощение операций, выполняемых людьми. Характерным примером может служить конвейерная линия по сборке автомобилей. На крупных автозаводах на главный конвейер поступает кузов автомобиля и примерно каждую минуту с конвейера сходит готовый автомобиль. За время движения по конвейеру на автомобиле монтируются все необходимые детали и узлы, подаваемые к главному конвейеру при помощи вспомогательных транспортеров, тележек и т. п. Монтаж осуществляется операторами, выполняющими какую-то одну операцию. Труд операторов весьма напряженный, однообразный и утомительный. В то же время на многих операциях это труд низкоквалифицированный. Подобным же образом обстоит дело с участием человека при обслуживании автоматизированных станков и отдельных участков. Тут функции человека обычно заключаются в выполнении простых операций — установке заготовки на станке и ее закреплении, снятии готового изделия и т. п.

На первый взгляд кажется парадоксальными инженеры, создав сложнейшее автоматное оборудование, до сих пор не смогли решить осуществления самых различных, казалось бы, но простых, чисто вспомогательных операций живанию автоматизированных линий, станковых производственных участков.

Однако парадоксальность существующей только кажущаяся. На первый взгляд весьма операции, выполняемые человеком при обслуживании автоматических станков, линий, часто оказываются трудно поддающимися автоматизации традиционными методами. Во многих случаях создаваемые будут либо весьма узкоспециализированными, очень сложными, дорогостоящими и недостаточными.

Кажущаяся простота действий оператора обусловлена универсальностью возможностей человека выполнять самые различные операции и совершенством органа — человеческой руки.

Человеческую руку с позиции теории механизмов можно представить как механизм, состоящий из плечевого, локтевого, лучезапястного суставов руки, которые соответственно обладают тремя, двумя и двадцатью степенями свободы.

При обслуживании станка токарь, обычно берет нужную заготовку независимо от того, где она расположена в ящике, ориентирует ее требуемым образом в пространстве, затем с нужной скоростью устанавливает ее в станку и закрепляет в зажимное устройство. Его внимание уделяется им обработке детали в соответствии с чертежом. Когда обработка детали завершена, он выключив станок, снимает деталь и помещает ее в специальный противень. После этого им может быть получено задание на изготовление другой детали.

Если все эти операции поручить автомату, то автомат должен иметь четкую программу действий, т. е. алгоритмическое управление и соответствующие средства ее осуществления. При этом программа должна быть весьма подробной. В ней должно быть определено, как должен вести себя автомат в зависимости от условий, о которых человек обычно и не задумывается при выполнении тех или иных операций. В данном случае характер первоначального расположения заготовки

раметры их перемещения (высота, углы поворота и пр.). В зависимости от этих и им подобных факторов должна быть предусмотрена возможность изменения программы автомата. Кроме того, автомат должен иметь соответствующий исполнительный орган — механическую руку — функции которого соответствовали бы функциям человеческой руки. Такие автоматы получили название промышленных роботов универсального назначения. Их можно использовать для обслуживания различных технологических процессов, участков, станков, линий.

Промышленный универсальный робот иногда называют автоматическим манипулятором с программным управлением. Характерной особенностью промышленного робота, отличающей его от других систем программного управления или регулирования, является механическая рука.

В универсальных станках с программным управлением имеется возможность изменения программы, записанной при помощи определенного кода в логике станка. Такие станки называются станками с цифровым управлением. Однако для их обслуживания необходим оператор. Если же применить промышленные роботы, то появится возможность полностью завершить комплексную автоматизацию производства, освободить человека от непосредственного участия в технологическом процессе.

Роботы, выполняющие определенную, заранее заданную программу, называются роботами первого поколения.

Промышленные роботы получают все большее распространение во всех развитых странах мира. В СССР также ведутся интенсивные работы по созданию промышленных роботов, разработано большое количество опытных образцов универсальных и специализированных роботов. Примером специализированных роботов может служить робот для автоматизации электросварочных работ, разработанный совместно институтом электросварки АН УССР им. Е. О. Патона и Горьковским автозаводом. Начато также производство универсальных роботов УМ-1.

В недалеком будущем следует ожидать все большего расширения функций промышленных роботов, создания самонастраивающихся кибернетических роботов, обеспечивающих оптимизацию режимов работы установок и автоматизированных линий.

6.3. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЯ

Основные задачи электромашиностроения — создание новых, более совершенных типов электрических машин. Для развития электроэнергетики требуются все более мощные, экономичные и высоковольтные электрические генераторы. Промышленности требуются компактные, простые в эксплуатации, высокоэффективные электродвигатели. Для систем автоматизированного электропривода требуются быстродействующие двигатели, необходимы создание машин минимальной массой и объемом, разработка новых электромеханических систем, объединяющих электрические машины с новейшими управляющими устройствами.

Для совершенствования электрических машин необходимо находить более прогрессивные конструкции и применять материалы с улучшенными свойствами.

Как же могут быть реализованы эти задачи в дальнейшем развитии электромашиностроения?

Современная техника проектирования достигла высокой степени совершенства. Применение компьютерной техники облегчает поиск оптимальных вариантов, позволяет осуществить более быстрое проектирование. Все это дает возможность в короткий срок выполнять расчет и разработку проектов электрических машин с заданными параметрами. Дальнейшим шагом вперед является внедрение методов автоматизированного проектирования, создание фондов машинных программ для проектирования машин разных типов и отдельных узлов.

Существенное повышение качества электрических машин возможно при использовании новых материалов для различных ее узлов машины. Улучшение качества электрической машины определяется повышением ее надежности при действии электрических, механических и тепловых нагрузок на конструктивные элементы. Исследования показывают, что 80...90% выходов из строя вызвано повреждением обмоток. В обмотках происходят основные потери и они подвержены наиболее высокому нагреву. В обмотках же протекают сложные процессы, возникающие при появлении и развитии

пряжения, что приводит к появлению значительных перенапряжений в их элементах. Наконец, именно обмотка подвержена действию сильнейших механических воздействий, особенно в переходных процессах. Все это предъявляет высокие требования как к материалу проводников, из которых состоит обмотка, так и к их изоляции.

В данное время нет возможности существенного улучшения качества проводниковых материалов. Для обмоток обычно используются медные или алюминиевые провода. По электрической проводимости медь и алюминий уступают только драгоценным металлам. Отсутствуют какие-либо предпосылки, позволяющие рассчитывать на существенное улучшение их электрических свойств. Однако различные сплавы этих металлов с повышенными механическими и технологическими свойствами уже сейчас находят широкое применение в электромашиностроении.

Причиной выхода обмотки из строя чаще всего является повреждение изоляции, которая должна выдерживать длительное воздействие различных факторов окружающей среды — влаги, озона, иногда масла или других веществ, имеющих в атмосфере. Кроме того, изоляция должна обладать высокой теплопроводностью для хорошей передачи теплоты от обмотки к окружающей среде и внутри самой обмотки. В высоковольтных машинах добавляются требования короностойкости, озоностойкости, стойкости к поверхностным, а иногда и дуговым разрядам. Создать абсолютно надежную изоляцию, устойчивую ко всем этим факторам, невозможно. Однако в улучшении качества материалов для изоляции электрических машин наблюдается существенный прогресс. Простейшая хлопчатобумажная изоляция была усилена пропиткой лаками или компаундами, что укрепило конструкцию обмотки, увеличило теплопроводность изоляции. Широкое распространение получила изоляция на базе слюды — микалента, микафолей, миканит. Наибольшие достижения связаны с развитием химии и созданием новых синтетических изоляционных материалов. Создан ряд высокопрочных теплостойких эмалей для покрытия проводов. Синтетические пленки заменили бумагу и хлопчатобумажную ткань. Широкое применение получила стеклянная ткань, пропитанная лаком, в сочетании с пленкой. Силиконовые материалы

и лаки в сочетании со слюдой, асбестом, стекчивают высокую теплостойкость изоляционных машин. Пропитка эпоксидными компаундами повышает механическую прочность конструкций.

Однако наряду с улучшением качества изоляции прерывно повышаются и требования к ней ввиду роста нагрузок активных материалов при со-здании конструкций машин. Кроме того, расширяются области применения электрических машин (моторостроение, космос, атомные установки) выдвигаются новые требования к изоляции.

Создание надежной высококачественной изоляции имеет большое народнохозяйственное значение и позволит не только создать более компактные машины и обеспечить громадную экономию активных материалов, но и высвободит колоссальный ремонтный труд людей, оборудование, материалы. Все данные для решения этой задачи есть. Уже сейчас химиками открыт широкий ряд органических, неорганических и металлоорганических (кремнийорганических, металлоорганических) соединений, которые могут быть использованы в электрических машинах. Они частично удовлетворяют нашему представлению об идеальной изоляции.

Совершенство второй важнейшей части электрической машины — магнитопровода — определяется количеством используемых магнитных материалов. Из них является электротехническая сталь. Современная промышленность добилась значительных успехов в повышении качества стали. В горячекатанной электротехнической стали, которая недавно была основным материалом для магнитопроводов электрических машин, в переменном магнитном поле частотой $f=50$ Гц индукции $B=1$ Тл выделяются потери 1, 5.. Современная холоднокатанная электротехническая сталь с повышенной магнитной проницаемостью в тех же условиях имеет потери порядка 0,9 Вт/кг. В результате индукция в магнитопроводе может быть увеличена, что позволяет понизить массу и габариты магнитопровода и всей машины.

Разработаны стали так называемой «низкопотерной» структуры, у которых удельные потери (на единицу массы) снижены еще в два раза.

Не менее важна задача повышения магнитной проницаемости ферромагнитных материалов в си-

нитных полях. Во всех магнитных материалах при больших индукциях происходит насыщение. Для дальнейшего повышения индукции требуется резкое увеличение напряженности магнитного поля, почти такое же, как и для немагнитной среды. В электротехнической стали насыщение наступает при индукции порядка 2,2 Тл. В последнее время получены материалы с индукцией насыщения 2,5 ... 3 Тл.

Весьма интересными являются работы по внедрению в производство электрических машин различных типов ферритов на синтетической или силикатной основе. Сами по себе ферриты представляют мелкодисперсный порошок магнитного материала, равномерно распределенный в связующем веществе. При малом процентном содержании ферромагнитных частиц в феррите он имеет плохие магнитные свойства, низкую магнитную проницаемость. Однако если частицы достаточно малы, то ферриты имеют очень низкие потери на перемагничивание и могут использоваться при высоких частотах, например в радиодиапазоне. При увеличении содержания ферромагнетика ряд частиц контактирует друг с другом и хотя магнитные свойства улучшаются, одновременно растут удельные потери.

Полученные в настоящее время ферриты приближаются по своим свойствам к электротехнической стали. Однако разработка новых связующих, обеспечивающих высокую адгезию к поверхности ферромагнитных частиц, и, следовательно, уменьшение контактов между ними, подбор ферромагнетиков и т. п. могут дать материалы, могущие конкурировать с традиционными. Возможность магнитопровода любой формы простейшим образом позволит не только упростить технологию, но и применить новые, более рациональные конструктивные формы магнитопровода.

Могут найти применение в электромеханике и сравнительно слабые (в магнитном отношении) ферриты в виде ферритосмол, ферритоконпаундов и т. п.

Наконец, особое место занимают работы по созданию новых магнитотвердых материалов для постоянных магнитов. В этой области имеются значительные успехи, что обуславливает более широкое применение постоянных магнитов в электромашиностроении. Магнитные материалы на основе углеродистых сталей были весьма слабыми — максимальная индукция такого магнита не

превышала 0,5 Тл. Кроме того, они были не «твердыми» в магнитном отношении. Под сравнительно слабого внешнего обратного магнитного поля они размагничивались. При размагничивания могла быть также механическая нагрузка, нагрев, старение. Существенным шагом вперед в создании сплавов типа ЮНДК. Магнитные свойства этого типа характеризуются максимальной индукцией 1,2... 1,3 Тл и размагничивающей напряженностью 400... 600 А/см.

Поиск новых материалов для постоянных магнитов продолжается. Предложен ряд новых композиций, например, самарий — кобальт, имеющих еще более высокие магнитные свойства.

Большое практическое значение имеет повышение механической прочности магнитных сталей для турбогенераторов. В настоящее время диаметр ротора турбогенератора при частоте вращения 3000 об/мин в условиях механической прочности не может превышать 125 см. Поэтому в машинах большой мощности возрастает длина ротора (до 6... 7 м). Применение более прочных сталей позволит придать турбогенераторам более рациональную форму и упростить конструкцию.

Применение новых материалов, создание новых сталей требует значительной научной, исследовательской и инженерной проработок, особенно в области проектирования.

Основные рабочие характеристики машин определяются электромагнитными процессами. Одним из важнейших показателей качества, как надежной работы, является совокупностью электромагнитных, механических и химических процессов, происходящих в различных узлах машины, а также исходными данными и технологией изготовления.

На конструкцию машины очень большое влияние оказывает принятая система охлаждения. Если для малой мощности охлаждаются обычно встроенными в машину, то для специальных машин задача усложняется. Так, долгое время для турбогенераторов предельной мощностью считались машины мощностью 200 МВт, причем основным ограничивающим фактором являлся нагрев машины. Разработка и применение методов непосредственного охлаждения активных

алов — проводников обмотки и стали магнитопровода — позволило преодолеть этот предел. Созданы турбогенераторы мощностью в 10 раз большей и это не предел для современного электромашиностроения. Для специальных машин малой и средней мощности, в которых применение непосредственного охлаждения затруднено, есть предложение использовать тепловые насосы. В простейшей форме такой «насос» представляет трубку, наполненную веществом с низкой температурой кипения — фреоном, аммиаком и т. п. Нижняя часть трубки встраивается в нагретую зону машины. Жидкость кипит, пары поступают в верхнюю часть трубки, снабженную радиаторами. Теплота отдается в окружающую среду. Для повышения теплоотдачи радиаторы охлаждаются струей воздуха или воды. Пары конденсируются и жидкость стекает в горячую зону, процесс идет непрерывно.

Разработка и совершенствование методов охлаждения позволит существенно улучшить конструкцию машин, повысить их надежность.

По мере улучшения конструкции растут требования к ней. Так, значительное внимание уделяется вопросу уменьшения шума и вибраций электрических машин. Борьба с шумом на производстве имеет значение не только для улучшения условий труда, но и непосредственно связана с возможностью более производительной работы. Не менее важно снижение шума двигателей для бытовых приборов и транспортных установок. Шум электрических машин обусловлен электромагнитными высокочастотными процессами в подшипниках, вентиляторе и других узлах. Поэтому снижение шума и вибраций возможно только в результате детального исследования соответствующих процессов и всей конструкции.

Наконец, эффективность конструкций в производстве, ее надежность во многом определяются технологией производства. Увеличение выпуска электрических машин возможно за счет повышения производительности труда, дальнейшей механизации и автоматизации производства. Применение новых конструктивных решений должно помогать решению этой задачи.

До сих пор рассматривались вопросы совершенствования традиционных электрических машин. Однако внимание ученых и инженеров привлекают возможности создания принципиально новых конструкций.

Одно из перспективных направлений так боток связано с применением сверхпроводящих электрических машинах, в первую очередь, для магнитов систем возбуждения. Созданы опытные машины с такими магнитами — униполярные двигатели постоянного тока, макеты турбогенераторов; изготовлены сверхпроводящие магниты для опытного магнитного динамического генератора. Однако современные сверхпроводящие материалы могут работать только при очень низких температурах, которые могут быть достигнуты в результате охлаждения жидким гелием. Это существенно усложняет и удорожает подобные машины. Поэтому ведется интенсивный поиск сверхпроводящих материалов, которые могли бы работать при более высоких температурах.

Физики-теоретики предсказывают возможность существования сверхпроводников, могущих работать даже при комнатных температурах. Создание таких машин может совершить переворот во всей электротехнике, совершенно изменить вид и конструкцию электрических машин. Резко возрастет эффективность всей электроэнергетики, изменятся схемы электропередачи и т. д. Поэтому любые шаги в этом направлении представляют для инженеров-электриков большой интерес.

Развитие полупроводниковой и электронной техники и разработка новых силовых управляющих элементов позволяют создавать не только новые системы управления обычными электрическими машинами, но и новые типы электрических машин, предназначенные для работы только с управляющими элементами. Такие машины, представляющие собой двигатели подобных машин являются новыми двигателями постоянного тока и шаговыми двигателями.

Как видно из самого названия, в бесщеточных двигателях постоянного тока отсутствуют коллекторы. Система возбуждения, обычно выполняемая с помощью постоянных магнитов, расположена на роторе. Якоря размещаются на статоре. Выводы якорей присоединены к полупроводниковому преобразователю, управляемому специальными датчиками положения. Датчики подают сигнал на переключение коммутатора, обеспечивая работу машины от угла поворота ротора. Эти двигатели обладают всеми достоинствами обычных машин постоянного тока, а отсутствие щелочного контакта повышает

дежность и дает возможность работать в очень сложных условиях окружающей среды.

Шаговые двигатели являются наиболее подходящим типом двигателей для систем дискретного управления. Полупроводниковый переключатель (коммутатор) подает управляющие импульсы на обмотки шагового двигателя. При подаче очередного импульса ротор шагового двигателя поворачивается на определенный угол (делает шаг). Управляющие импульсы обрабатываются с большой частотой и точностью.

Дальнейшая разработка электромеханических систем с полупроводниковыми элементами может привести к созданию весьма совершенных и быстродействующих приводов. При этом предполагается применять электрические двигатели, работающие на новых принципах, т. е. использующих пьезоэффект, магнитострикционный эффект и т. д. Таким образом, электромашиностроение в перспективе будет развиваться не только количественно, но и качественно, и для этого развития требуется большой труд ученых и инженеров.

6.4. ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ЛИНЕЙНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Линейный электродвигатель представляет собой электрическую машину с плоским индуктором. Вторичный элемент может выполняться в виде полосы из алюминия, меди или стали.

Известно большое количество различных конструкций линейных двигателей. На рис. 6.4 в качестве примера показаны два варианта применения линейного двигателя для перемещения некоторой платформы 3 по направляющим роликам 4. Линейный двигатель выполнен по двухиндукторной схеме. Индукторы I могут располагаться как на перемещающейся платформе (рис. 6.5, а), так и на путевой структуре (рис. 6.5, б). При этом соответствующим образом должен располагаться и вторичный элемент — полоса 2.

Преимуществом второго варианта является более простая схема электропитания двигателя и перемещаемого объекта. Однако при больших расстояниях перемещения затраты на сооружение такой установки могут быть значительно большими, чем в первом варианте. При подаче тока в обмотку индуктора образуется

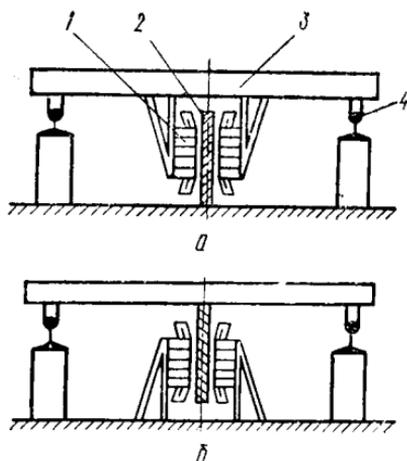


Рис. 6.4. Варианты размещения линейных электродвигателей транспортной платформы.

бегущее магнитное поле во вторичном элементе создается э. д. с., создающей магнитное поле. В результате взаимодействия магнитного поля во вторичном элементе индуктора создается тяговое усилие, вызывающее перемещение платформы в требуемой форме в требуемом направлении.

Линейный электродвигатель известен человечеству с прошлого столетия.

Примерами его применения могут служить изобретения, сделанные в 1917 году, работы по созданию

аппаратов для запуска самолетов с авианосцев, ракетные двигатели в США в 1946 г., и др.

В СССР первые практические работы по применению линейных электроприводов выполнялись в 1950-е годы на машинах ударного действия.

Вследствие неудовлетворительных технических показателей линейные электроприводы в настоящее время не получили распространения и работы по их совершенствованию и конструированию практически прекращены.

В последние 12...15 лет в СССР, США, Англии, Японии, ЧССР, ПНР и других странах исследования в области линейных двигателей вновь активизировались.

Рассмотрим особенности электроприводов с линейными асинхронными двигателями, которые относятся к области их применения, так и перспективы развития.

Основным достоинством этого вида электропривода является возможность получения линейного перемещения объекта без каких-либо механических передач, изменяемых в электроприводах с вращающимися частями механическими машинами.

При оценке достоинств приводов с линейными двигателями обычно отмечается, что их применение позволяет увеличить надежность, упростить конструкцию двигателя и установки в целом, снизить

массу и стоимость применяемого электрооборудования. В ряде случаев указывается на повышение к.п.д. установки за счет устранения потерь в механических передачах, а также на возможность получения больших величин ускорения и замедления. Для будущих транспортных установок с линейными двигателями, над разработкой которых работают во многих странах, важным является возможность получения скоростей до 400... 500 км/ч без загрязнения воздуха и чрезмерного шума, что является весьма существенным фактором.

Наряду с перечисленными достоинствами линейные двигатели обладают рядом существенных недостатков.

В линейных двигателях величина воздушного зазора, как правило, намного больше, чем у машин вращательного действия. Поэтому значения коэффициентов мощности и к.п.д. у них оказываются значительно меньшими. Результаты расчетов и экспериментальных исследований, приводимые различными авторами, показывают, что к.п.д. и мощности линейных двигателей примерно в 1,5 раза меньше соответствующих величин двигателей вращательного действия.

При сравнении энергетических показателей необходимо учитывать, что применение линейного двигателя, позволяя устранить механические передачи и соответствующие им потери, может также привести к изменению стоимости, массы, габаритов установки. Вопрос о технико-экономической эффективности применения линейных электроприводов должен решаться с учетом изменения к.п.д. установки в целом, коэффициента мощности, надежности, стоимости и других факторов.

Следует отметить, что результирующий к.п.д. установки с двигателями вращательного действия (не говоря уже о коэффициенте мощности), с учетом к.п.д. передачи, будет, как правило, выше, чем к.п.д. линейного двигателя.

Существенной особенностью, которую можно классифицировать как недостаток линейных двигателей, ограничивающий область их применения, является практическая невозможность получения малых скоростей перемещения (менее 1,5... 2,0 м/с) при промышленной частоте питающего напряжения. Такие скорости в электроприводах с линейными двигателями можно получить только используя преобразователи, понижающие частоту, что значительно усложняет систему электропривода,

лишая ее одного из главных достоинств — ухудшает надежность и увеличивает стоимость.

Серьезным недостатком привода с линейными тягами является невозможность работать с большой мощностью, обеспечивая изменение тяговых усилий при изменении скорости. Аналогичная задача в приводах двигателями вращательного движения решается значительно проще за счет изменения передаточного числа редуктора.

Эксплуатационная надежность линейных двигателей во многом зависит от надежности устройств, обеспечивающих постоянство зазора между подвижной частью двигателя. Необходимость таких устройств неизбежно усложняет конструкцию и снижает его надежность.

Отрицательным свойством линейных двигателей является также наличие продольного и поперечных эффектов, обусловленных искажением магнитного поля на краях разомкнутого магнитопровода. Эти эффекты существенно ухудшают характеристики двигателей.

Для уменьшения влияния краевых эффектов принимают различные меры: увеличение числа полюсов, увеличение воздушного зазора у концов индуктора; использование компенсационных обмоток; выполнение магнитопровода элемента с поперечными прорезями и пр.

Определенные трудности вызывает сложное влияние краевых эффектов в каждом конкретном случае и отсутствие достаточно общей методики проектирования линейных двигателей.

При решении вопроса о применении линейных двигателей их достоинства и недостатки должны быть тщательно проанализированы в отдельном случае. Такой анализ должен быть комплексным и учитывать все аспекты применения двигателя для решения конкретной задачи.

Можно указать следующие, наиболее перспективные области применения линейных двигателей.

1. Установки, в которых применение линейных двигателей является единственно оправданным и логически возможным решением.

Наиболее характерным примером такого является высокоскоростной наземный транспорт на основе применения линейных двигателей при

ном подвесе транспортного экипажа. Работы в этом направлении достаточно интенсивно ведутся почти во всех промышленно развитых странах мира.

Преимуществами ВСНТ на магнитном подвесе по сравнению с другими видами транспорта, обеспечивающими скорости движения более 500 км/ч (авиатранспорт, транспорт на воздушной подушке с применением реактивных двигателей), являются более высокие экономические показатели, отсутствие загрязнения окружающей среды и относительная бесшумность движения.

В настоящее время ВСНТ — одна из наиболее перспективных и интересных областей применения линейного электропривода. Она ставит перед наукой и промышленностью целый комплекс сложных проблем, выходящих за рамки обычных задач электропривода. Среди них можно назвать: технико-экономическое обоснование выбора маршрутов ВСНТ, устройство транспортной магистрали, разработка и исследование конструкции экипажа, системы электроснабжения и др.

2. Установки, в которых возможно использование двигателей вращательного действия, однако применение линейного электропривода позволяет упростить конструкцию установки, повысить ее надежность.

В этом случае уменьшение коэффициентов мощности и полезного действия, а также другие недостатки линейного привода должны компенсироваться ростом производительности, уменьшением массы, габаритов, существенным улучшением конструкции.

Примером может служить привод поршневого насоса для откачки нефти, который размещается в скважине и непосредственно приводит плунжер насоса. Использование линейного двигателя в этом случае дает возможность обойтись без колонны вращающихся штанг из высоколегированной стали, что улучшает технико-экономические показатели работы нефтедобывающей скважины и повышает ее производительность.

Другим характерным примером могут служить приводы различных быстродействующих исполнительных короткоходовых механизмов, потребление энергии которыми незначительно и может не приниматься во внимание. Основным фактором в этом случае является простота и надежность конструкций привода, определяющие бесперебойность технологического процесса и его технико-экономические показатели.

6.5. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ

Составной частью многих систем автоматического электропривода являются различного рода преобразовательные устройства. Они применяются для преобразования энергии вращающихся якорных цепей и обмоток возбуждения синхронных машин постоянным током, получаемым в результате выпрямления переменного тока из сети. С их помощью изменяют частоту и напряжение, с целью обеспечить регулирование скорости электродвигателей переменного тока.

Современные преобразовательные устройства строятся, главным образом, на основе полупроводниковых приборов.

Они применяются для преобразования переменного тока в постоянный с регулируемым напряжением, для образования постоянного тока одного напряжения из переменного тока другого напряжения, преобразования частоты переменного тока и других целей.

Основные преимущества полупроводниковых преобразовательных устройств по сравнению с приборами других типов (электромашинными, магнетронными и др.) следующие: меньшие габариты и масса; меньшие технико-экономические показатели; более высокая надежность; облегченные условия работы обслуживающего персонала; более высокое быстродействие.

Достаточно характерным примером может служить тенденция к замене электромашинного генераторного блока в различных системах полупроводниковыми преобразователями. Как известно, в системе Г — Д — Т генераторная установка постоянного тока используется как приводной двигатель, приводимый во вращение асинхронным электродвигателем переменного тока. Тогда энергия переменного тока при помощи двигателя преобразуется в энергию постоянного тока и генератора преобразуется в энергию переменного тока.

В состав генераторного блока системы Г — Д — Т входит приводной двигатель переменного тока, силовой трансформатор, генератор или электродвигатель постоянного тока, усилитель для питания обмотки возбуждения генератора.

Электромашинные генераторные блоки используются также для получения нерегулируемого напряжения, питающего аппаратуру, работающую на постоянном токе. При этом электромашинный преобразователь состоит только из двух электрических машин — генератора постоянного тока и приводного двигателя переменного тока.

Для установки достаточно мощных электромашинных преобразователей требуется изготовление соответствующих фундаментов, что ведет к увеличению габаритов зданий и капитальных затрат. Кроме того, эксплуатация такого рода преобразователей сопровождается непрерывным шумом, неблагоприятно влияющим на работу обслуживающего персонала. Электромашинные преобразователи требуют постоянного ухода, что усложняет их эксплуатацию.

Недостатком системы Г—Д является также сравнительно низкий к.п.д., определяемый произведением к.п.д. трех электрических машин — приводного двигателя переменного тока, генератора и двигателя постоянного тока.

Замена электромашинного генераторного блока полупроводниковым преобразователем позволяет создать преобразователь без вращающихся деталей меньшей стоимости и габаритов, высшим к.п.д.

Важной задачей является разработка преобразователей переменного тока в постоянный мощностью несколько тысяч киловатт при напряжении порядка нескольких киловольт, позволяющих обеспечить плавное регулирование выходного напряжения в широких пределах. При недостаточной мощности полупроводниковых элементов преобразователя возможно их последовательно-параллельное соединение. При этом, благодаря последовательному соединению элементов, обеспечивается требуемая величина общего напряжения преобразователя, а за счет параллельного — нужные величины тока. Однако в этом случае увеличивается количество полупроводниковых элементов в схеме преобразователя, возрастают трудности согласования их работы и управления ими. Это ведет к увеличению стоимости и уменьшению надежности преобразователя.

Поэтому создание мощных, высокоэкономичных и надежных полупроводниковых преобразователей является одной из актуальных технических задач.

В области электропривода полупроводниковые элементы применяются также для создания бесконтактных реле, используемых для построения различных схем автоматического управления, в том числе для электронных управляющих устройств.

Кратко рассмотрим принцип действия и особенности полупроводниковых приборов, являющихся основными элементами современных полупроводниковых аппаратов самого различного назначения.

Для полупроводников характерно кристаллическое строение. Между атомами кристаллической решетки существуют связи, образованные валентными электронами, которые взаимодействуют не только с ядром атома, но и с соседними. Такая связь между атомами называется ковалентной.

При освобождении электрона из ковалентной связи под действием внешних факторов в кристаллической решетке возникает как бы свободное место, обладающее положительным зарядом, равным по абсолютной величине заряду электрона. Такое освободившееся место в ковалентной связи условно назвали дыркой.

Дырка обладает положительным зарядом, поэтому она может присоединять к себе электрон соседней ковалентной связи. В результате устанавливается одна связь и разрушается соседняя. Таким образом, дырка и одновременно возникает в другом месте. Дырка, переходя от одного атома к другому, перемещается по кристаллу, что равносильно перемещению положительно заряженной частицы. В отсутствие внешнего электрического поля дырки и электроны вследствие теплового движения перемещаются в кристалле хаотически.

Если полупроводниковый кристалл поместить в электрическое поле, то движение дырок и электронов станет упорядоченным и в кристалле возникнет электрический ток.

В химически чистом кристалле полупроводника количество дырок равно числу свободных электронов. Электрический ток образуется в результате одновременного переноса зарядов обоих знаков. Такая электрическая проводимость называется собственной проводимостью полупроводника.

Для изготовления большинства полупроводниковых приборов необходимо иметь полупроводник с

раженной проводимостью одного типа. Это достигается за счет введения в полупроводник различных примесей, во много раз увеличивающих количество свободных носителей зарядов и улучшающих электропроводность полупроводника.

Существуют примеси, которые позволяют резко увеличить количество свободных электронов. При этом образуются полупроводники с электронной проводимостью, или полупроводники типа n . Есть примеси, увеличивающие количество дырок, в результате чего образуются полупроводники с дырочной проводимостью, или полупроводники типа p .

Область на границе двух полупроводников с различными типами проводимости называется электронно-дырочным переходом, или $p-n$ переходом.

Наиболее важным свойством полупроводника с электронно-дырочным переходом является односторонняя проводимость электрического тока. Это свойство объясняется следующим образом. При отсутствии внешнего источника напряжения движение зарядов через $p-n$ переход происходит за счет диффузии основных носителей зарядов из одной области проводимости в другую. Концентрация электронов в полупроводнике типа n больше, чем в полупроводнике типа p , поэтому электроны переходят из полупроводника типа n в полупроводник типа p . Пограничный слой полупроводника типа p заряжается при этом отрицательно, а типа n , потеряв электроны, положительно. В результате на границе полупроводников типа n и p скапливаются заряды различных знаков и возникает внутреннее электрическое поле — потенциальный барьер. Этот барьер препятствует дальнейшей диффузии электронов из полупроводника типа n в полупроводник типа p . Поэтому при отсутствии внешнего поля электрический ток через $p-n$ переход не протекает.

При подключении источника э. д. с. E с полярностью, указанной на рис. 6.5, электроны и дырки под действием внешнего поля будут двигаться к пограничному слою. В результате этого пограничный слой пополняется носителями зарядов и его электрическое сопротивление уменьшается. В электрической цепи будет протекать значительный ток $I_{пр}$, называемый прямым. Если изменить полярность источника э. д. с. на обратную, то электроны и дырки в веществе под действием электриче-

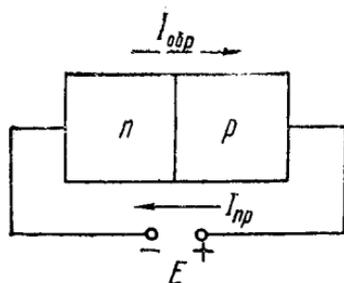


Рис. 6.5. Электронно-дырочный переход.

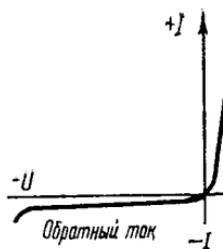


Рис. 6.6. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода.

ского поля источника э. д. с. будут перемещаться к границе $p-n$ переходного слоя. В этом случае количество свободных носителей электричества в районе $p-n$ перехода уменьшится, что приведет к увеличению электрического сопротивления перехода и резкому уменьшению протекающего тока. Протекающий в этом случае ток $I_{обр}$ называют обратным. Его направление показано на рисунке стрелкой.

Если к $p-n$ переходу подключить источник с изменяющейся полярностью, то ток в цепи будет течь практически лишь в одном направлении, соответствующем направлению прямого тока. Прибор, состоящий из электронно-дырочного перехода, называемый полупроводниковым диодом (выпрямителем или выпрямителем). Он может использоваться как выпрямитель переменного тока.

Вольт-амперная характеристика (зависимость I от приложенного напряжения U) полупроводникового диода показана на рис. 6.6.

Вентильные свойства полупроводниковых диодов во многом зависят от рабочей температуры материала. При ее повышении разность между прямым и обратным сопротивлением запирающего слоя резко уменьшается, и характеристика выпрямителя ухудшается.

В настоящее время нашей промышленностью выпускаются кремниевые выпрямители на токи в несколько сотен ампер при рабочих напряжениях в сотни вольт.

Другим широко применяемым полупроводниковым прибором является транзистор. Обычно транзистор имеет два $p-n$ перехода.

Схема точечного транзистора, выполненного из германия с проводимостью типа n , показана на рис. 6.7.

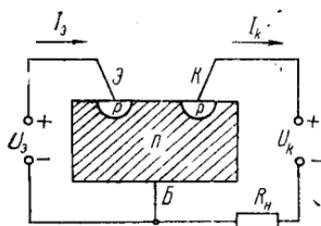


Рис. 6.7. Схема точечного транзистора.

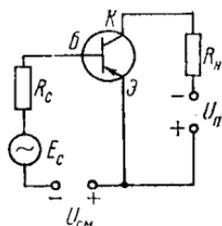


Рис. 6.8. Схема усилителя с общим эмиттером.

К пластинке полупроводникового вещества присоединены три контакта (электрода) — эмиттер Э, коллектор К, база Б. За счет специальной обработки в местах присоединения электродов Э и К образуются области вещества с проводимостью типа P.

Транзистор представляет собой, по существу, два полупроводниковых диода, имеющих одну общую область — базу, причем к эмиттерному $p-n$ переходу приложено напряжение $U_э$ в прямом направлении, а к коллекторному переходу — напряжение $U_к$ в обратном направлении.

Если разность потенциалов эмиттера и базы равна нулю, то под действием напряжения $U_к$ от базы к коллектору, т. е. в цепи нагрузки $R_н$, будет протекать незначительный обратный ток $I_к$.

При подаче на эмиттер положительного потенциала относительно базы в цепи эмиттер — база появляется значительный по величине ток $I_э$, так как к $p-n$ переходу между эмиттером и базой приложено напряжение в прямом направлении.

Коллектор находится по отношению к эмиттеру под значительно бóльшим отрицательным потенциалом по сравнению с потенциалом базы, а расстояние между электродами К и Э малó, поэтому часть электронов идет не к базе, а к коллектору. В результате этого происходит усиление тока в выходной цепи усилителя, т. е. в нагрузке $R_н$. При этом незначительное изменение напряжения $U_э$ ведет к существенному изменению тока, а следовательно, и мощности в цепи нагрузки.

Точечные транзисторы применяют при небольших мощностях. В усилителях большой мощности контакт вещества с электродами выполняют не точечным,

а плоскостным. От точечного плоскостной транзистор отличается лишь конструктивными особенностями.

Усиление электрических сигналов постоянным током с помощью транзистора основано на зависимости тока коллектора от величины напряжения, приложенного к участку эмиттер—база. Упрощенная схема усилителя с общим эмиттером показана на рис. 6.8.

Во входной (эмиттерной) цепи усилителя включен источник переменного тока (сигнала) с э. д. с. E_c и внутреннее сопротивление R_c . К этой же цепи введено напряжение смещения $U_{см}$, определяющее режим работы усилителя. В выходной (коллекторной) цепи усилителя включена нагрузка R_H и источник питания с напряжения U_H . Изменение э. д. с. источника E_c в эмиттерной цепи вызывает соответствующее изменение тока в нагрузке.

Усилитель характеризуется коэффициентами усиления по напряжению, току и мощности, которые являются отношением величины на выходе усилителя к величине в цепи нагрузки R_H к соответствующей величине в цепи входного сигнала.

Кроме диодов и транзисторов в схемах управления электроприводами широко применяются управляемые диоды — тиристоры. Они являются основными элементами мощных управляемых полупроводниковых преобразователей.

В СССР первые тиристоры были разработаны в 1959—1960 гг. и очень быстро нашли широкое применение в самых различных отраслях электротехники. Это объясняется многими преимуществами тиристоров: незначительными размерами на единицу мощности, высокими допустимыми токами (1000 В и выше) и током (сотни ампер) при к. п. д., мгновенной готовностью к работе и т. д.

Тиристор представляет собой четырехслойный полупроводниковый прибор, состоящий из четырех чередующихся областей проводимости p и n .

Схематическое изображение четырехслойной структуры тиристора приведено на рис. 6.9. Зона, обеспечивающая электрическую связь с n -областью, называется катодом K , а с внешней

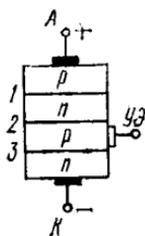


Рис. 6.9. Четырех-
слойная структура
тиристора.

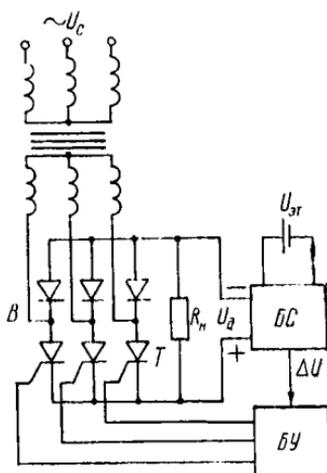


Рис. 6.10. Схема ти-
ристорного стабили-
затора напряжения.

ластью — анодом A . С внутренней p -областью соединен управляющий электрод УЭ.

При отсутствии напряжения на управляющем электроде и подаче на анод отрицательного по отношению к катоду напряжения $p-n$ переходы 1 и 3 будут заперты, а $n-p$ переход 2 — открыт. В целом тиристор будет заперт и по нему будет протекать небольшой обратный ток. При положительном напряжении на аноде переходы 1 и 3 открываются, а переход 2 закрывается, поэтому тиристор по-прежнему остается закрытым.

Для открывания тиристора надо подать положительный относительно катода потенциал на управляющий электрод. При этом ток через тиристор скачком увеличится до максимальной величины, определяемой значениями и анодного напряжения и сопротивления нагрузки (на рисунке нагрузка не показана). После открывания тиристора изменение тока в цепи управляющего электрода не оказывает влияния на величину тока в нагрузке. Чтобы закрыть тиристор, необходимо изменить полярность напряжения между анодом и катодом.

Особенностью тиристорov является импульсный характер изменения выходного тока, возможность получения больших коэффициентов усиления.

В качестве примера использования тиристорov рассмотрим схему стабилизированного выпрямителя напряжения (рис. 6.10).

Известно, что напряжение в сетях переменного тока изменяется в зависимости от нагрузки. Промышленные отклонения напряжения могут составлять 10...15% от номинального значения. Для многих электротехнических устройств такие колебания напряжения недопустимы.

В приведенной на рис. 6.10 схеме имеется мостовой источник эталонного напряжения $U_{\text{эт}}$. Блок управления $БУ$ определяет величину отклонения ΔU эталонного напряжения $U_{\text{д}}$ на выходе трехфазного выпрямителя B по отношению к $U_{\text{эт}}$. Величина ΔU подается на блок управления $БУ$ и, воздействуя на тиристоры T , меняет момент их открывания.

Если $\Delta U = 0$, то напряжение на нагрузке L равно номинальному. При этом на блок управления $БУ$ подается некоторая величина напряжения, которая определяет момент открывания тиристоров и длительность их работы при положительной полуволне анодного напряжения, т. е. величину напряжения на нагрузке $U_{\text{н}}$. При $\Delta U > 0$, то импульс на открытие тиристоров будет несколько позже, что приведет к уменьшению напряжения $U_{\text{н}}$. При $\Delta U < 0$ импульс на открывание тиристоров дается раньше и величина выпрямленного напряжения увеличивается.

Тиристорные стабилизаторы позволяют поддерживать напряжение со сравнительно большой точностью, допуская отклонения напряжения на нагрузке в пределах 0,1...0,5% при колебаниях напряжения сети, составляющих 20...40%.

В заключение кратко рассмотрим некоторые современные тенденции применения полупроводниковых элементов в области электропривода и автоматизации прерывное усложнение технических задач, которые приходится решать при помощи систем автоматизации электропривода, неизбежно ведет к усложнению и увеличению стоимости аппаратуры и соответствующим требованиям автоматического управления.

Современной тенденцией в области электропривода является непрерывный рост количества деталей и узлов в электронных устройствах. По имеющимся данным за 10 лет их количество возрастает в среднем на порядок. Так, например, радиоприемник в 1930 г. содержал в среднем 100...200 деталей, осциллограф в 1950 г. — 1000...2000, аппаратура телевизионной переносной системы в 1950 г. — 10000...20000, электронные вычислительные машины в 1950 г. — 100000...200000.

машины в 1960 г. — около 100...200 тысяч. Современные многомашинные вычислительные комплексы (1970 г.) имеют количество деталей, исчисляемое миллионами.

Чем больше элементов содержит некоторое устройство, тем ниже его надежность. Поэтому при конструктивной разработке и проектировании для повышения эксплуатационной надежности, облегчения ремонтов и обслуживания электронную аппаратуру стремятся выполнить в виде отдельных конструктивно оформленных функциональных блоков — модулей.

В ряде случаев (например, движущиеся объекты) к аппаратуре в качестве одного из основных предъявляется требование иметь минимально возможные габариты и массы. В этом случае полупроводниковые модули стремятся выполнять с минимальными габаритами (микромодули).

В последние годы на основе развития микроэлектроники быстрыми темпами развивается новое направление, получившее наименование интегральной техники.

Характерной особенностью интегральных микромодулей и интегральных схем является объединение (интеграция) в одном конструктивно неделимом элементе ряда различных функций. Например, один элемент может выполнять функции усиления, выпрямления, ограничения тока и др. Таким элементом может служить отдельный кристалл кремния, в котором за счет специальной обработки получают области с различными свойствами, между которыми имеются необходимые электрические соединения и изоляционные прослойки. Это позволяет в одном кристалле создать большое число схемных ячеек, соединенных между собой в сложную функциональную схему. Совершенствование интегральных схем представляет собой одно из основных и перспективных направлений развития электроники, которое ведет к постепенному вытеснению из состава электронной аппаратуры отдельных традиционных элементов, таких как конденсаторы, транзисторы, резисторы.

Развитие этого направления неизбежно приведет к соответствующим изменениям и в области автоматизированного электропривода.

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

7.1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ НАУЧНО-ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

Л. И. Брежнев в докладе, посвященном 60-летию Великой Октябрьской социалистической революции, заявил, что науке предстоит внести огромный вклад в решение важных задач строительства коммунизма.

Эти задачи в ближайшие десятилетия будут решать научно-инженерные кадры, которые сегодня обучаются в вузах страны. Объем этих задач и жизненная ответственность их решения в кратчайшее время требуют перестройки и модернизации высшей школы системы подготовки кадров. Основная задача высшей школы состоит в подготовке специалистов, которые могут оптимальным образом использовать преобразования социалистического строя и достижения научной революции для построения коммунистического общества. Для этого выпускник вуза должен быть не только хорошим специалистом, но и иметь коммунистические марксистско-ленинские убеждения, уметь работать с людьми и быть хорошим организатором производства. Он должен обладать глубокими технико-экономическими знаниями по своей специальности.

В настоящее время, в условиях технической революции, возникло противоречие между бурным ростом объема информации почти в каждой отрасли знаний и ограниченными возможностями ее усвоения, обусловленными с одной стороны физиологическими особенностями человека, а с другой — сроками обучения. Решение этой проблемы требует от высшей школы серьезной перестройки ее работы.

При этом сам учебный процесс становится объектом научных исследований. Возникает множество вопросов, которые можно свести к двум основным — чему и как обучать будущего специалиста в конкретной области науки и каким образом это следует делать. Решение этих вопросов требует совершенствования учебных программ, методов преподавания, основанных на глубоком анализе учебного процесса.

Требования повышения эффективности и качества, поставленные XXVI съездом КПСС, в условиях высшей школы следует рассматривать как подготовку выпускников вузов, глубоко овладевших социально-экономическими и технологическими знаниями за время, отведенное учебным планом по данной специальности. Следует совершенствовать методику обучения таким образом, чтобы каждый час занятий был использован наилучшим образом. Для этого необходима научно-обоснованная организация учебного процесса, т. е. должно быть установлено наиболее целесообразное соотношение лекционных, практических и лабораторных занятий, времени, отведенного на самостоятельную работу и занятия в институте, на курсовое и дипломное проектирование, а также на производственные практики.

Поскольку знания, полученные в вузе по конкретным техническим вопросам, в связи с бурным технологическим прогрессом сравнительно быстро устаревают, то особое значение приобретает глубокая подготовка студентов по основным для данной специальности общетехническим дисциплинам, а также привитие навыков самостоятельной и учебно-научной работы.

Навыки в области научных исследований, полученные в институте, умение самостоятельно работать с книгой, разбираться в новых вопросах и решать возникающие технические задачи при условии глубокой общетехнической подготовки — гарантия будущей успешной работы выпускника вуза.

Следует подчеркнуть еще один аспект необходимости привлечения студентов к научным исследованиям — это привитие интереса к своей специальности, являющегося важнейшим фактором глубокого усвоения материала, повышения успеваемости, подготовки высококвалифицированного специалиста.

Необходимым условием эффективности процесса обучения является современная учебная материально-техническая база, включающая новейшие технические средства обучения, вычислительную технику, приборы и оборудование. С ее помощью студент должен получать не только глубокие теоретические знания, но также навыки и опыт работы проектировщика, исследователя и, в меньшей мере, организатора производства. Поэтому понятие материально-технической учебной базы должно выходить за рамки учебного института. За учебными

вузами целесообразно постоянное закрепление в данной отрасли научных и проектно-конструкторских организаций, а также производственных предприятий. Они, наряду с выпуском основной продукции, должны участвовать в подготовке будущих инженеров соответствующей специальности. Студентам должны быть предоставлены рабочие места, их следует вовлекать к активному участию в решении производственных задач и общественной жизни коллективов. В учебных организациях должны быть постоянные опытные мастера, выполняющие функции наставников студентов и молодых инженеров-стажеров.

Широкое привлечение студентов к научным работам — один из основных путей повышения качества подготовки будущих инженеров. Научная работа студентов должна проводиться по трем направлениям: научно-исследовательская работа (НИРС), выполняемая в часы, предусмотренные учебным планом специальности, работа в студенческом научном обществе (СНО) и специальных студенческих конструкторских бюро (СПКБ), а также участие в хозяйственных работах кафедр.

НИРС является формой, которая требует от студентов работы по корректировке учебных планов, созданию учебных пособий и новых лабораторных работ. Ее преимуществом является практически полное привлечение студентов к научной работе и привитие самостоятельных навыков. Как можно более раннее привлечение студентов к научно-исследовательской работе позволяет резко поднять качество выполнения курсовых и дипломных проектов, подготовки будущего специалиста в целом.

Можно привести много примеров, когда студент, выполнивший научно-исследовательскую работу по заданию кафедр с 3-го курса, принимая систематическое участие в научных студенческих конференциях, конкурсах, выполнял по данной тематике курсовые и дипломные проекты, что позволяло сформироваться ему как самостоятельному специалисту и получить прочную основу для будущей работы в качестве инженера или научного работника.

Развитие материально-технической учебной базы, совершенствование программ и методики обучения, управление процессом на приобретение студентами глубоких знаний в области физико-математической и электротехнической науки и техники.

Твердого коммунистического мировоззрения, прочных экономических знаний на основе рационального построения учебного процесса, а также все более широкое привлечение студенчества к научно-исследовательской работе — залог успешной подготовки специалистов — электриков и электромехаников, соответствующих современным требованиям.

7.2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРОВ В УСЛОВИЯХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ

Наше время часто называют эпохой научно-технической революции (НТР). Человечество уже переживало подобные переломные эпохи, связанные с резкими изменениями способа и организации производства. И каждый переходный период был связан не только с изменением структуры производства, но и с ломкой социальных отношений и форм. Промышленный переворот XVIII в., приведший к созданию крупного машинного производства взамен мануфактур, явился базисом для буржуазных революций. На современном этапе осуществляется следующий шаг — переход к крупному автоматизированному машинному производству. В систему производства вводится новый элемент — управляющее устройство, выполняющее вычислительно-логические функции, необходимые для ведения технологического процесса. В этом процессе существенно изменяются все элементы материального производства — и машины, и технология, и структура управления.

Важнейшую роль в этом процессе играет наука, явившаяся основой этого сдвига и превратившаяся в непосредственную производительную силу. Создание крупного автоматизированного машинного производства невозможно осуществить без широчайшего использования электричества во всех звеньях — от машин-орудий до управляющих машин.

НТР особенно резко показывает различие возможностей и целей социалистического и капиталистического строя. Только социалистический строй открывает широкие возможности использования достижений научно-технической революции в интересах всего народа. В капиталистическом обществе все сильнее проявляются препятствия на пути развития НТР. Сам способ произ-

водства входит во все большее противоречие с новыми формами капитализма. Все это обостряет противоречия между двумя мирами, двумя системами, вызывает повышение требования к уровню идеологической подготовки советского специалиста и учителя.

Конституция СССР гарантирует гражданам Советского Союза право на образование, в том числе Ленинские принципы образования: бесплатное, доступное широким массам трудящихся обучение в высшем государственном стипендиальном обеспечении и др. Мы сумели решить задачу о создании новой советской интеллигенции. Эти принципы определили колоссальный успех в развитии высшей школы и подготовке специалистов в нашей стране. В дореволюционной России почти три четверти взрослого населения были неграмотны. В стране насчитывалось всего 105 высших учебных заведений со 127 тыс. студентов и 450 средних учебных заведений с учащимися. Сегодня в нашей стране 859 вузов с 1,5 млн. студентов. Вместе с учащимися техникумов общее количество учащихся составляет 9,6 млн. человек. В народном хозяйстве работает 12,5 млн. специалистов среднего образования. Эта армия специалистов может решать любые задачи развития народного хозяйства и культуры. Она ежегодно пополняется молодыми специалистами, которые выходят из стен высших учебных заведений.

Новая Конституция не только провозглашает право на образование, но и гарантирует его осуществление на обучение, обеспечением обязательного среднего образования, развитием профессионально-технического образования, заочного и вечернего образования, созданием условий для самообразования.

На подготовку кадров наша страна выделяет значительные средства, более 1000 руб. ежегодно на одного студента. Только за последние годы стипендии студентов вузов повышены в среднем на 25%, учащихся техникумов — на 50%.

Все выпускники советских вузов обеспечиваются работой по специальности.

Проблема подготовки специалистов в эпоху научно-технической революции существенно усложняется рядом факторов. Среди них, о чем уже шла речь, — быстрый рост объема науки и техники в каждой отрасли науки и техники, а также

ние научно-технического прогресса, требующее быстрого обновления знаний. И, наконец, расширение круга знаний и методов, необходимых современному специалисту.

Неотъемлемым признаком НТР стала автоматизация и механизация умственного труда. Разработаны и все шире внедряются в жизнь разнообразнейшие вычислительные системы — портативные вычислительные машины, инженерные вычислительные системы, быстродействующие вычислительные и управляющие системы с разнообразнейшим периферийным оборудованием, облегчающим диалог человек — машина. Это означает не только изменение средств проведения расчетов, но и изменение самих методов и методологии исследований, проектной и конструкторской работы. Кибернетики утверждают, что в недалеком будущем специалисты должны будут не столько уметь найти ответ, сколько правильно поставить вопрос. Несмотря на некоторое преувеличение, сама по себе такая перспектива означает перестройку самого стиля и образа мышления, требует резкого расширения кругозора специалиста будущего.

С другой стороны, мощь производства настолько возросла, что перед инженерно-техническими работниками возникают совершенно новые проблемы — экологические. Они заключаются в устранении вредных воздействий (загрязнений) производственной деятельности на окружающую среду: загрязнения атмосферы и гидросферы, тепловых воздействий, влияния мощных электромагнитных полей. Один из важнейших путей решения экологической проблемы связан с разработкой безотходных технологий.

Для успешного решения этих проблем требуется существенное расширение кругозора специалистов-техников, т. е. усиление их подготовки в смежных областях знаний.

В резолюции XXIV съезда Коммунистической партии Советского Союза отмечалось, что важной задачей в деле воспитания молодежи является дальнейшее совершенствование всей системы образования в соответствии с потребностями развития экономики, науки и культуры, научно-технической революции.

Образование и воспитание молодежи должно служить формированию у новых поколений коммунистических убеждений и морали, беспредельной преданности социалистической Родине.

7.3. УЧЕБНЫЕ ПЛАНЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ

Высшая школа является составной частью системы народного образования нашей страны и ставит единую задачу, сформулированную еще Н. С. Гусевым и выраженную в том, что у начальной, средней и высшей школ одна общая цель: воспитание всеобщих развитых людей с сознательными и организованными общественными инстинктами, имеющих цельное мировоззрение, ясно понимающих все, что происходит вокруг них в природе и общественно-политической жизни.

Учебный план должен обеспечить как специальную и так и общественно-политическую подготовку специалиста.

Дисциплины, входящие в учебный план, должны равномерно распределиться по следующим направлениям:

1. Марксистско-ленинская подготовка.
2. Подготовка в области экономики и организации производства.
3. Общественно-инженерная подготовка.
4. Проектно-конструкторская подготовка.
5. Техническая подготовка.
6. Научно-исследовательская подготовка.

Учебная работа планируется таким образом, чтобы обеспечить практическую непрерывность подготовки специалистов по каждому направлению и логическую связь между дисциплинами и отдельными направлениями подготовки.

При составлении учебных планов по различным специальностям учитывается, что в течение первых курсов обучения подготовка специалистов по различным специальностям ведется параллельно, обеспечивая единство фундаментальной общенаучной подготовки.

Каждое направление включает в себя цикл практических занятий и различные виды практик, которые должны обеспечить не только формальное изучение предметов, но и умение применять это знание на практике.

Особое внимание следует уделять воспитанию марксистско-ленинского мировоззрения молодых специалистов, их идейной вооруженности. Студенты первых курсов: история КПСС, марксистско-ленинская философия, научный коммунизм, научный атеизм, и

ско-ленинская этика и эстетика. Теоретическая подготовка оканчивается сдачей государственного экзамена по научному коммунизму. Несмотря на непрерывность подготовки, нельзя ожидать, что только изучение лекционного материала может обеспечить становление идейно-политического сознания молодого специалиста. Большое внимание в процессе обучения уделяется самостоятельной работе с первоисточниками, составлению и чтению докладов, рефератов. Значительное внимание вопросам идейно-политической подготовки уделяется и при чтении других курсов, в том числе и специальных.

Участие в общественной жизни института, работа в студенческих строительных отрядах, общественно-политическая практика должны не только обеспечить формальные знания, но и научить правильно разбираться в конкретно складывающейся социально-политической обстановке, вести идейно-воспитательную работу в коллективе, сформировать активную жизненную позицию будущего инженера.

Подготовка в области экономики и организации производства обеспечивается следующими дисциплинами: политическая экономия; организация, планирование и управление предприятиями; автоматизированные системы управления предприятием; основы советского права; гражданская оборона. Вопросы экономики рассматриваются также в соответствующих специальных курсах, особенно проектно-конструкторского направления. Экономические вопросы включены в курсовые и дипломные проекты. Большую ценность для ознакомления с вопросами прикладной экономики и организации производства представляют производственные практики (технологическая, конструкторская и преддипломная). В результате обучения молодой специалист приобретает знание конкретной экономики как своей отрасли, так и понимание общих государственных экономических задач. Не менее важно значение методов современной организации производства, основ плано-экономических расчетов. Современный специалист должен уметь определить стоимость и себестоимость продукции, рассчитать технико-экономические показатели работы.

Фундаментальная подготовка определяется циклом дисциплин, которые можно разделить на две группы.

Общеинженерная подготовка обеспечивается дисциплинами: введение в специальность, физика, химия, ана-

литическая геометрия, математический анализ, точечная техника в инженерных и экономических областях, иностранный язык.

Эти курсы определяют общенаучную подготовку специалиста и знакомят с перспективами развития техники в областях, представляющих интерес для данной специальности, например, в области физики сверхпроводящих систем, атомной энергетики, синтетических материалов, современных методов математического исследования. Непрерывность массовой подготовки обеспечивается не только чистыми дисциплинами, но и широким использованием различных разделов математики в специальных курсах. Важное значение для подготовки специалиста имеет знание иностранного языка. С целью развития навыков технического перевода и овладения языком помимо лекционных и практических занятий и выполнения объема самостоятельной работы над текстами предусматриваются различные мероприятия, вызывающие интерес к овладению языком, — интернациональные встречи, вечера дружбы и т. п.

Основные знания в области электротехники и электротехнических курсов: теоретические основы электротехники, технические материалы, электрические измерительные машины, электрические аппараты, электрическая электроника, техника высоких напряжений, теория электропривода, теория автоматического управления, телемеханика.

Цикл общеинженерных дисциплин является основой для подготовки специалистов широкого профиля. Для освоения полученных знаний необходимо развивать умение пользоваться достижениями фундаментальных наук в производственной и научно-исследовательской работе. В процессе изучения этих дисциплин студент приобретает навыки и умения работы с книгой и библиотекой, умения находить источники, конспектирования и реферирования прочитанной литературы, пользования иностранной литературой.

Подготовка инженеров по избранной специальности связана с изучением циклов дисциплин, соответствующих проектно-конструкторскому, технологическому, научно-исследовательскому направлениям.

Знание основных теоретических соотношений и навыки в проектировании студенты приобретают

чении и инженерной графики, теоретической механики, прикладной механики, проектирования. В проектно-конструкторской подготовке особенно большое значение имеет развитие навыков проектирования и умения пользоваться существующими ГОСТами, нормами, справочными материалами, методиками, приобретаемыми при выполнении курсовых проектов и работ, а также во время производственных практик. При этом активно усваиваются основы механических, электромагнитных, тепловых и вентиляционных расчетов, методов управления, регулирования и схемных решений в области электропривода.

Особенно ценными являются работы по реальной тематике. Сознание самостоятельности и значимости проводимой работы повышает чувство ответственности студента за выполняемую работу.

Проектно-конструкторская подготовка является одним из определяющих факторов качественного выполнения и защиты дипломного проекта или дипломной работы.

Особые трудности связаны с технологической подготовкой молодых специалистов. Именно здесь особенно справедлива пословица, что лучше один раз увидеть, чем десять раз услышать. В действительности еще важнее не только увидеть, но и научиться выполнять операции самому.

В этом отношении курсы технологии материалов, охраны труда и производство электрических машин дают общетеоретическое представление и навыки выполнения простейших операций. Реально основную часть технологической подготовки студенты получают в ходе практик.

Производственная практика в процессе институтского обучения играет особую роль. Знакомство с современной технологией, оборудованием, новыми материалами, организацией производства, овладение некоторыми технологическими операциями — это одна из основных задач практики. Однако не менее важна ее воспитательная роль — работа в коллективе, умение решать хотя бы простейшие производственные и организационные задачи, все это является важнейшим фактором для воспитания молодого специалиста, выработки его активной жизненной позиции.

Оптимальным в этом смысле является создание на базе вузов учебно-научно-производственных объедине-

ний. В этом случае в процессе обучения студент непосредственно вовлекается в сферу производства, задачи его обучения и воспитания решаются практически.

Учитывая значение практической подготовки специалистов, государство выделяет для проведения исследований ведущие предприятия отрасли, на которых можно ознакомиться с передовыми методами производства.

Подготовка к научно-исследовательской работе ведется обычно по специальности. Например, по специальности «Электрические машины» основными являются курсы: основы научных исследований, специальный курс электрических машин, электрические системы авторегулирования, современные проблемы электромеханики, надежность электрических машин.

Для подготовки специалистов по электроприводу и автоматизации промышленных установок проводятся курсы: основы научных исследований, современные вопросы электропривода, современные проблемы электропривода, элементы систем автоматизации, автоматическое управление электроприводами, автоматизация типовых технологических процессов и проектирование установок.

Очевидно, что теоретическое обучение в данном случае не может само по себе развить навыки исследовательской работы. Основным условием является самостоятельная работа студентов в различных формах как экспериментальных исследований, так и теоретических (подготовка реферативных обзоров, проведение патентного поиска и т. п.).

Завершается подготовка инженера в вузе с защитой дипломного проекта или диплома. При этом студент не только использует знания, приобретенные в процессе подготовки, но и продолжает обучение. Дипломный проект — это самостоятельная работа студента, в которой он уже выступает в роли консультанта. Сам студент должен провести анализ условий работы, обосновать требования, выбрать наилучшее решение, предложить варианты решения и дать их технико-экономическую оценку.

В настоящее время растет число реальных проектов, выполняемых для конкретных целей, часто в промышленности. Выполнение таких проектов

молодых специалистов с практическими сторонами инженерной работы, повышает их самосознание и способствует формированию грамотных инженерных кадров.

7.4. РАБОТА СТУДЕНТОВ В ВУЗЕ

Успех в деле подготовки специалиста определяется не только и не столько учебными программами и планами, но в первую очередь работой студентов. Учение является основной работой студентов, от ее результатов во многом зависит их дальнейшая жизнь. И студенты должны четко представлять, что для достижения поставленной цели необходим труд, и труд напряженный. Вся учебно-методическая работа в институте направлена на то, чтобы облегчить студентам этот путь. Однако основное условие преодоления всех трудностей обучения — это работа самого студента. Одна из важнейших и первых задач, стоящих перед студентами, — научиться учиться. Это важно не только для обучения в институте, эта наука нужна инженеру во всей его творческой жизни.

Процесс обучения и освоения знаний может быть разбит на этапы: понимание материала, усвоение знаний, выработка навыков практического использования этих знаний и, наконец, умение творчески применять их. Очень важно для студента не останавливаться на втором, а тем более на первом этапе. Если первые этапы сравнительно легко поддаются формальной проверке, то приобрести практические навыки, а тем более умение использовать полученные знания студент может только в самостоятельной творческой работе. Причем эта работа должна идти параллельно обучению. Надо отметить, что полученные знания непрерывно применяются в ходе изучения последующих дисциплин и особенно в процессе подготовки к различным практическим занятиям и во время их проведения.

Отличие учебного процесса в вузе от школьного, необходимость перестройки стиля и методов работы часто вызывают серьезные трудности у студентов младших курсов. Большая самостоятельность, отсутствие постоянной опеки и контроля требуют самостоятельности и в организации своего рабочего времени. Чересчур соблазнительной представляется иногда возможность отложить ту или иную работу на «потом». От такого подхода

особенно страдает проработка лекционного материала, так как остальные виды учебной работы легче систематически контролируются. В то же время лекция несет важнейшую роль в учебном процессе. И несут основной поток учебной информации и дают понимание и знание, необходимые для дальнейшего практического использования. В лекциях в подходящей форме излагается основное в дисциплине, выявляются наиболее современные тенденции и проблемы. Квалифицированный лектор учит к самостоятельному мышлению, осуществляет обратную связь с аудиторией, разъясняя возникающие вопросы. Хорошая лекция требует высокой квалификации преподавателя большой подготовки. Но еще более велика аудитория, студентов. Прежде всего неподготовленные студенты не заинтересуются материалом лекции, не будут активно воспринимать ее. Подготовленный студент считает такого слушателя, который усвоил материал, может, не сбиваясь, следить за мнением лектора, за логикой ее развития.

Большую роль в усвоении материала играет подготовка лектора. Важно не механически фиксировать слова, а, записывая основные положения, проводить творческую работу по усвоению материала. Активно работать на лекции можно только в том случае, если студент подготовлен к ней. Подготовка в первую очередь заключается в проработке предыдущего материала систематическом просмотре предыдущих лекций. Этого времени невелика, но дает очень большое количество. Этот рецепт прост и известен давно. Н. К. Крыжовник отмечала необходимость неоднократного и неспешного перечитывания материала предыдущего занятия. По окончании крупного раздела следует повторить материал в целом по конспекту и учебнику. Надо сразу же проверить, что не существует альтернативы — или конспект, или учебник.

Правильный метод работы заключается в сочетании как конспекта, так и учебника. Сплошной конспект не может заменить учебник, строгая формальная полнота мешает мыслить на лекции, сознательно воспринимать материал. Необходимо разумное сочетание, создающее наилучшие условия для сознательного восприятия материала при наименьших затратах времени.

С конспектом надо работать, поэтому можно дать ряд советов по ведению конспектов. Конспект по каждому предмету следует вести в отдельной тетради, писать на одной стороне листа, оставляя поля. На полях удобно отмечать непонятные места, вопросы, вносить короткие разъяснения. Чистая сторона листа используется для дополнений, преобразований, проводимых самостоятельно при работе над материалом с учебником. Писать желательнее достаточно четко, чтобы не тратить время на разбор текста. В то же время для ускорения ведения конспекта рекомендуется широко использовать сокращения и условные обозначения. Особенное внимание необходимо обращать на качественное и точное воспроизведение графического материала.

При наличии хорошего конспекта и учебника самостоятельная работа над материалом предыдущей лекции требует затраты времени от 15 до 30 мин, предусмотренных в балансе времени самостоятельной работы студентов. Эта затрата времени заведомо окупает себя, не только исключая штурмовщину в период сессии и обеспечивая более прочное закрепление знаний, но и меняя всю атмосферу работы. Понимание излагаемого в очередной лекции материала облегчает восприятие и вызывает интерес у студента, меняет отношение между лектором и аудиторией. Лектор чувствует настроение и подготовленность аудитории и соответственно корректирует излагаемый материал. Важен и психологический настрой — в благодатной атмосфере лекция проходит с подъемом, живо, гораздо более интересно и для слушателей и для лектора.

Правильная систематическая работа над материалом лекций дает студентам не только понимание изучаемого предмета, но и знание основных его соотношений и положений. Однако навыки практического использования этих знаний, умение применять их для решения конкретных задач приобретаются в ходе практических и лабораторных занятий, курсового проектирования и производственной практики.

Можно дать некоторые советы студентам по этим видам работы.

Практические занятия дают навыки решения типовых задач на основе теоретических положений данного курса. Очевидно, уровень и круг задач, рассматриваемых в аудитории, непосредственно зависит от ее возмож-

ностей и подготовленности. В то же время не способствует повышению интереса к предмету своих возможностей, как решение задач, основанных с практикой. Истинная заинтересованность является, если удастся получить решение задачи своим методом.

Важной стороной подготовки инженера является умение обращаться с цифровым материалом, вычисления, владеть современной вычислительной техникой. Сегодня уже стоит вопрос и о технической подготовке. Счетная линейка вытесняется электронной машиной. Продуктивное использование счетной линейки и вычислительной машины требует специальной подготовки и опыта, которые приобретаются практикой. На какие счетные средства делается упор в этот вопрос в разных вузах решается по-разному. Безусловно, специалист должен выработать навыки по использованию ручных счетных устройств и уметь пользоваться современной вычислительной техникой.

Особое место в учебном процессе занимают лабораторные занятия. В первую очередь это объективный процесс познания. Лабораторные занятия не только подкрепляют теоретический материал, но и готовят подготовку, необходимую для исследовательской работы. В ходе лабораторных работ вырабатываются навыки постановки и проведения экспериментальных работ, умение работать с оборудованием и измерительной аппаратурой, выявлять основные закономерности процессов. Это необходимо не только для будущего ученого, но и для инженера-производственника.

Однако для того, чтобы лабораторные занятия наполнили эти функции, необходимо сознательное участие к ним студента. Наибольший вред приносит пассивное участие в лабораторных занятиях с целью воспроизведения результатов. Лабораторные занятия проводятся бригадами, что необходимо для работы с различными приборами и оперативного выполнения работы. Активные члены бригады проводят основную работу, а пассивные, неподготовленные, выполняют только механическую работу, переписывая результаты. Для активного участия необходима предварительная подготовка к работе — знакомство с теорией и методикой работы. Только в этом случае возможно

ное планирование и проведение работы, оценка полученных результатов.

Важной частью работы является ведение протокола испытаний и составление отчета. Протокол должен содержать всю информацию по проведению эксперимента — схемы, данные аппаратуры и измерительных приборов, масштабы измерений, экспериментальные данные. В ходе эксперимента необходимо выполнять первичную обработку результатов — построить графики зависимостей, получить математическое решение и т. п. По таблице данных трудно судить, насколько хорошо проведен эксперимент, в то время как график дает наглядное представление о достаточности полученной информации, о разбросе опытных данных, что позволяет внести необходимые коррективы в проведение эксперимента.

Отчет по лабораторной работе должен содержать обработку экспериментальных данных, анализ проведенной работы, оценку того, насколько полученные результаты согласуются с теоретическими положениями, выяснение причин отклонения.

При хорошей подготовке к лабораторной работе и наличии полного протокола составление отчета сразу после проведения работы не требует значительной затраты времени.

Следует еще раз подчеркнуть, что студент, который недостаточно ответственно относился к проведению лабораторных работ, будет иметь большие пробелы в своей инженерной подготовке.

Инженер должен не только иметь достаточные знания, но и уметь воплощать их в конкретные инженерные решения, которые воплощаются в проекты.

В учебном процессе умение и навыки проектирования приобретаются при выполнении курсовых и дипломных проектов. Курсовой проект состоит из пояснительной записки и графической части. В пояснительной записке рассматривается поставленная задача, приводятся основные расчеты, дается обоснование принятых решений, основные схемы, рассматриваются рабочие характеристики спроектированного устройства, оценивается соответствие техническому заданию, нормам и ГОСТам, а также дается технико-экономическая оценка полученных решений. Графическая часть согласно заданию обычно содержит общий вид разработанного устройст-

ва, показывающий компоновку, сочетание узлов и деталей, лировку.

При проектировании студент использует знания по целому циклу дисциплин и воплощает их в разработку, в которой должен учитывать требования эксплуатации, но и технологические возможности. И пояснительная записка, и графические работы выполняются с учетом всех существующих нормативных документов, в частности ЕСКД, единиц СИ и т. д.

В учебном плане предусмотрен ряд проектов, позволяющих ознакомиться с основными проблемами, возникающими в ходе инженерных разработок. Учебное проектирование ведется под руководством преподавателя, по мере приобретения навыков студента ожидается все большая степень самостоятельности. При защите проекта он отвечает за правильность принятых решений. Особое положение в этом отношении занимает дипломный проект, где руководитель выступает консультантом, а все основные решения принимает проектант.

Качество оформления пояснительной записки, стиль изложения, качество графического материала все это характеризует как общую, так и индивидуальную культуру автора проекта.

При проектировании необходимо строго соблюдать график выполнения проекта, который устанавливается руководителем с учетом всего учебного процесса. Рекомендация — выполнять курсовой проект в более свободной, половине семестра.

По большинству видов учебных занятий и методические пособия и указания, которые обязательны для студентов при подготовке и проведении работ.

Конечно, приведенные здесь рекомендации являются исчерпывающими и даже не охватывают все учебные занятия. Первокурсник может ознакомиться с более развернутыми рекомендациями по организации работы в соответствующих методических пособиях. Например, «Советы студентам высших технических учебных заведений», П. Г. Грудинский, П. Г. М. Г. Чиликин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев В. Г.* Научно-техническая революция, управление, образование. — М.: Политиздат, 1972.—431 с.
2. *Белькин Д. Д., Веселовский О. Н., Конфедератов Н. Я. и др.* История энергетической техники. — 2-е изд., испр. и доп. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1960.—664 с.
3. *Вейтков Ф. И.* Летопись электричества. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1946.
4. *Веников В. А., Путятин Е. В.* Введение в специальность. Электроэнергетика. — М.: Высшая школа, 1978.—293 с.
5. *Веселовский О. Н., Шнейберг Я. А.* Энергетическая техника и ее развитие. — М.: Высшая школа, 1976.—303 с.
6. *Вольдек А. И.* Электрические машины. — 3-е изд., испр. и доп. Л.: Энергия, 1978.—832 с.
7. *Грудинский П. Г., Ионкин П. А., Чиликин М. Г.* Советы студентам высших технических учебных заведений. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Высшая школа, 1972.—88 с.
8. *Динамомашин*а в ее историческом развитии. Документы и материалы/Под ред. В. Ф. Миткевича. — М.: Изд-во АН СССР, 1934.
9. *Жимерин Д. Г.* Энергетика: настоящее и будущее. — М.: Знание, 1978.—190 с.
10. *Карцев В. П.* Магнит за три тысячелетия. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Атомиздат, 1978.—159 с.
11. *Лавренцов В. Д.* Основы автоматкии, вычислительной техники и радиотелеметрии. — М.: Машиностроение, 1977.—192 с.
12. *Миткевич В. Ф.* Физические законы электротехники.—Л.: Кубуч, 1932.—560 с.
13. *Наземный транспорт 80-х годов*/Под ред. Р. Торнтонна. — М.: Мир, 1974.—184 с.
14. *Нейман Л. Р., Калантаров П. Л.* Теоретические основы электротехники. — 5-е изд., испр. и доп. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1959.—296 с.
15. *Попович Н. Г., Данильчук Г. И., Лисовский В. С. и др.* Автоматизация производственных процессов угольных шахт. — Киев: Вища школа, 1978.—335 с.
16. *Попович Н. Г.* О некоторых современных тенденциях в развитии электромеханики. — Техническая электродинамика, 1979, № 1, с. 46—51.
17. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановская лекция по физике. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Мир, 1976.—439 с.
18. *Чиликин М. Г., Ключев В. Н., Сандлер А. С.* Теория автоматизированного электропривода. — М.: Энергия, 1979.—616 с.
19. *Шателен М. А.* Русские электротехники XIX века. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1955.—432 с.
20. *Электродвигатель* в его историческом развитии. Документы и материалы/Под ред. В. Ф. Миткевича. — М.: Изд-во АН СССР, 1936.—660 с.
21. *Энергетика мира*/Под ред. П. С. Непорожного. — М.: Энергия, 1976.—183 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	
Введение	
Глава 1. Основные законы электротехники	
1.1. Электрическое поле, его силовые и энергетические характеристики	
1.2. Магнитное поле постоянного тока	
1.3. Электродинамика. Электромагнитное поле	
1.4. Электрические и магнитные цепи постоянного тока	
1.5. Цепи переменного тока	
Глава 2. Развитие энергетики	
2.1. Общее значение энергетики. Развитие электроэнергетики в СССР	
2.2. Мировые энергоресурсы и проблема энергетического кризиса	
2.3. Характеристика видов топлива	
2.4. Запасы топлива и топливно-энергетический баланс	
2.5. Виды и особенности электростанций	
2.6. Линии электропередачи и энергетические системы	
Глава 3. Электрические машины	
3.1. Исторические сведения о развитии электрических машин постоянного тока	
3.2. Исторические сведения о развитии машин переменного тока	
3.3. Основные соотношения и характеристики электрических машин	
3.4. Классификация электрических машин	
3.5. Конструкция электрических машин постоянного тока	
3.6. Современные типы машин постоянного тока и особенности их применения	
3.7. Конструкция синхронных машин	
3.8. Асинхронные двигатели	
3.9. Трансформаторы	
3.10. Специальные машины	
3.11. Развитие электромашиностроения в СССР	
Глава 4. Основы электропривода	
4.1. Краткие исторические сведения о развитии электроприводов	
4.2. Электроприводы постоянного тока	
4.3. Электроприводы переменного тока	
4.4. Режимы работы электроприводов	

Глава 5. Автоматизированный электропривод в народном хозяйстве	108
5.1. Технологические процессы и особенности их автоматизации	108
5.2. Классификация и особенности автоматических устройств и систем	111
5.3. Общие особенности применения электропривода. Электропривод горной промышленности	117
5.4. Примеры применения электроприводов в различных отраслях народного хозяйства	128
Глава 6. Перспективы развития электромеханики	134
6.1. Основные направления в развитии электроэнергетики	134
6.2. Основные направления развития автоматизированного электропривода	141
6.3. Перспективы развития электромашиностроения	150
6.4. Особенности и перспективы применения электроприводов с линейными двигателями	157
6.5. Основные особенности и перспективы развития преобразовательных полупроводниковых устройств, применяемых в электромеханике	162
Глава 7. Подготовка специалистов для народного хозяйства	172
7.1. Современные проблемы подготовки научно-инженерных кадров	172
7.2. Основные требования к подготовке инженеров в условиях научно-технической революции	175
7.3. Учебные планы подготовки специалистов	178
7.4. Работа студентов в вузе	183
Список литературы	189

Андрей Владимирович Новиков,
Николай Гаврилович Попович,
Иван Матвеевич Постников,
Леонид Александрович Радченко

ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ.

**Электрические машины,
электропривод и автоматизация
промышленных
установок**

Научный редактор *А. В. Ковальчук*

Редактор *Л. И. Мубаракшина*

Переплет художника *А. Ф. Мороза*

Художественный редактор

С. П. Духленко

Технический редактор

С. Л. Светлова

Корректор *И. П. Бойко*

Информ. бланк № 7251

Сдано в набор 20.03.81. Подп. в печать
21.08.81. БФ 37846. Формат 84×108¹/₃₂. Бу-
мага типогр. № 2. Лит. гарн. Выс. печать.
10,08 усл.-печ. л. 10,34 усл. кр.-отт. 9,82
уч.-изд. л. Тираж 6000 экз. Изд. № 5127.
Зак. 765. Цена 50 к.

Головное издательство издательского объ-
единения «Вища школа», 252054, Киев-54,
ул. Гоголевская, 7.

Белоцерковская книжная фабрика респуб-
ликанского производственного объедине-
ния «Поліграфкнига», 256400, г. Белая Цер-
ковь, ул. Карла Маркса, 4.