

О. Н. ВЕСЕЛОВСКИЙ, Я. А. ШНЕЙБЕРГ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА и ее развитие

*Рекомендовано
Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
для использования в учебном процессе
в высших учебных заведениях*



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1976

6П2.1
В38
УДК 620.9(075)

Рецензенты: Зав. сектором истории современной научно-технической революции Института истории естествознания и техники АН СССР проф. Шухардин С. В.; проф. Равдоник В. С. (Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина).

В38 **Веселовский О. Н., Шнейберг Я. А.** Энергетическая техника и ее развитие. Учеб. пособие для энергетич. и электротехн. специальностей вузов. М., «Высш. школа», 1976.

304 с. с ил.

В книге излагаются общие закономерности развития техники, раскрывается диалектический процесс развития тепло-, гидро- и электроэнергетики, важнейших применений электроэнергии и средств управления и автоматики от их возникновения до наших дней. Рассматриваются перспективы развития энергетической техники в условиях современной научно-технической революции.

В $\frac{30301-124}{001(01)-76}$ 165—75

6П2.1

ПРЕДИСЛОВИЕ

Научно-технический и социальный прогресс предъявляет сегодня к выпускнику высшей школы повышенные требования. Советский специалист—это гармонично развитый человек, овладевший основами марксистско-ленинского учения, в совершенстве владеющий своей специальностью, активный участник коммунистического строительства.

Единство обучения и воспитания, сочетание процесса приобретения профессиональных знаний с формированием марксистско-ленинского мировоззрения — основа высшего образования в нашей стране.

В постановлениях ЦК КПСС и Совета Министров СССР о высшей школе указывается, что каждый преподаватель вуза должен на примере своей дисциплины в процессе ее преподавания помогать студенту сформировать основы марксистско-ленинского мировоззрения, овладеть диалектическим и историческим материализмом.

Преподаватели технических дисциплин должны умело показывать закономерности развития той или иной отрасли техники, ее тесную взаимосвязь не только с другими техническими науками, но и с общественными явлениями, воспитывать у студента материалистический подход к оценке явлений научно-технического прогресса.

Но для этого каждый преподаватель должен хорошо знать не только современное состояние конкретной отрасли техники, но и историю ее развития.

В условиях научно-технической революции исключительную роль для будущего инженера, ученого приобретает умение изыскивать наиболее эффективные методы организации и управления производством, планирования и прогнозирования научно-технической деятельности.

Опыт поколений показывает, что нужно хорошо знать прошлое, чтобы ориентироваться в настоящем и предвидеть будущее.

Как указывал В. И. Ленин, «самое надежное в вопросе общественной науки... это — не забывать основной исторической связи, смотреть на каждый вопрос с точки зрения того, как известное явление в истории возникло, какие главные этапы в своем развитии это явление проходило, и с точки зре-

ния этого его развития смотреть, чем данная вещь стала теперь» *.

Настоящая книга предназначена главным образом для начинающих преподавателей энергетических и электротехнических дисциплин, недостаточно знакомых с историей развития энергетической техники. Она может быть использована и как учебное пособие на факультетах повышения квалификации преподавателей, организованных в последние годы в крупнейших вузах страны.

Авторы надеются, что книга окажется полезной и для преподавателей, читающих курсы «Введение в специальность», а также при подготовке ими вводных лекций по спецкурсам.

Отдельные разделы книги могут представить интерес для студентов, аспирантов и инженеров, интересующихся развитием энергетики и электротехники.

Ранее опубликованное авторами совместно с профессорами Л. Д. Белькиндом и И. Я. Конфедератовым учебное пособие по истории энергетической техники [31] имело другое назначение, а ныне стало библиографической редкостью. В новой работе авторы, к сожалению, уже без Л. Д. Белькинда, который до последнего дня своей жизни оставался энтузиастом историко-технической науки и организатором многих исследований, а также без И. Я. Конфедератова, не сумевшего принять участие в этой работе по состоянию здоровья, старались сохранить, по возможности, выработанный ранее метод изложения и оценки исторических фактов и явлений. В книге использована часть материалов, уже опубликованных ранее в коллективном труде. Так, в частности, в изложении общих закономерностей развития техники, в истории теплотехники и теплоэнергетики использованы материалы проф. И. Я. Конфедератова. При рассмотрении некоторых вопросов ранней истории электротехники использованы материалы проф. Л. Д. Белькинда.

Светлой памяти своего учителя, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, доктора технических наук, профессора Льва Давидовича Белькинда посвятили авторы этот свой труд. Доктору технических наук, профессору Ивану Яковлевичу Конфедератову авторы благодарны за весьма ценные советы и замечания, высказанные при обсуждении плана и некоторых глав рукописи книги.

При изложении материала авторы стремились отразить закономерности развития энергетической техники. Освещение деятельности и оценку вклада отдельных ученых и инженеров читатель может найти в фундаментальных трудах по истории развития техники (см. например, 25, 26, 33).

Состояние некоторых отраслей энергетической техники наших дней достаточно подробно освещено в учебниках и моно-

* В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 39, стр. 67.

графиях, поэтому в отдельных случаях авторы ограничивались лишь общей характеристикой основных направлений развития. В частности, это относится к энергомашиностроению, автоматике, вычислительной технике.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам рукописи заведующему сектором Института истории естествознания и техники Академии наук СССР доктору технических наук, профессору С. В. Шухардину и профессору кафедры общей электротехники Ленинградского политехнического института В. С. Равдонику за ценные замечания и указания. С большой благодарностью авторы отмечают работу редактора книги В. А. Терехова. Авторы также благодарят Л. Я. Шнейберг, оказавшую помощь при подготовке рукописи к печати.

При работе над книгой авторы встретились с рядом трудностей. Понимая, что книга не лишена недочетов, авторы с благодарностью примут все замечания и пожелания, которые просят направлять в адрес издательства «Высшая школа».

Авторы

ТЕХНИКА И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЕЕ РАЗВИТИЯ

ПОНЯТИЕ «ТЕХНИКА». ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ
И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ

В течение многих тысячелетий человек в процессе трудовой деятельности создавал орудия и средства для производства материальных благ — главной силы, определяющей развитие общества.

Маркс определял средства труда как материальные вещи или комплексы вещей, которые человек ставит между собой и предметом труда для воздействия на этот предмет труда*. В зависимости от характера воздействия — механического, теплового, химического — средство труда принимает конкретную форму молота, реактора, печи и т. д.

К средствам труда относится не только то, что оказывает непосредственное воздействие на предмет труда и носит название орудий труда, но и все материальные условия, необходимые для эффективного выполнения процесса труда (освещение, отопление, энергоснабжение, транспорт). Совокупность всех средств труда, создаваемых в системе общественного производства, и составляет содержание понятия «техника».

Слово «техника» произошло от древнегреческого слова «техне», что означает умение, мастерство. Оно и сейчас применяется для оценки мастерства артистов, музыкантов, спортсменов, в тех областях человеческой деятельности, в которых результат трудового процесса зависит преимущественно от личных качеств.

Эффективность же труда гораздо больше зависит от используемых средств труда, поэтому и слово «техника» применительно к трудовому процессу постепенно все более стало характеризовать не мастерство исполнителя, а применяемые средства труда, которые и получили название «техника».

Техника — понятие собирательное. Подобно тому как одна газовая молекула не подчиняется законам, присущим газам как совокупности многих миллиардов молекул, так и отдельный технический объект не определяется закономерностями, характерными для техники в целом. Техника — это вся совокупность средств труда, находящихся в распоряжении общества на данной ступени его развития.

* См.: К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 23, стр. 190.

Природа покоряется человеку, который познает ее законы и применяет их в процессе труда. Технические объекты создаются на основе познания законов природы, которое на отдельных этапах развития может быть грубым, приближенным. Так, применяя кремневое рубило или трением получая огонь, первобытный человек не знал количественных соотношений, выражаемых законами механики и термодинамики, но он знал качественную форму внутренних взаимосвязей явлений, познannую на опыте. По мере познания законов природы уточнялись и расширялись технические приемы и конструктивные формы средств труда.

Явления природы, используемые человеком в процессе труда, определяют собой конструктивные формы средств труда: дляковки нужен тяжелый молот, для резания — острый нож, для аккумуляции механической энергии — упругая пружина и т. п.

Цель процесса труда состоит в изменении предмета труда. Это может быть изменение геометрической формы (ковка, прокатка, резание и т. п.), структуры (закалка, отжиг, полимеризация и т. п.), состава материала (окисление, получение сплавов, полимеров и т. п.) и др. Но всякое изменение формы, структуры, состава и т. п. неизбежно связано с соответствующим изменением энергии как в пределах одного ее вида, так и при переходах ее из одной формы в другую. Поэтому все производственные процессы являются энергетическими.

Таким образом, в процессе труда человек использует вещество и энергию природы. Он либо использует первичную энергию природы (биологическую, гидравлическую, тепловую, лучистую и др.), либо преобразует ее во вторичную (например, в электрическую), затем при посредстве орудия труда направляет ее на предмет труда, получая нужный продукт.

Приведенное положение справедливо для любого уровня развития техники. Маркс показал это для машинного производства середины XIX в., когда писал о совокупности машин, состоящей из трех существенно различных частей: машины-двигателя (генератора энергии), передаточного механизма (передатчика энергии) и машины-орудия, или рабочей машины*, которая за счет полученной ею энергии изменяет предмет труда.

Техника служит не только для производства материальных благ; она неразрывно связана с культурой общества. Так, техника книгопечатания способствует широкому распространению идей великих мыслителей, бессмертных творений художников слова; техника радио и телевидения приблизила живое слово и художественный образ к миллионам радиослушателей и телезрителей.

Но радиоприемник или телевизор — это и один из элементов сложных средств труда диктора, с помощью которых его могут увидеть и услышать одновременно миллионы людей; и одновременно техническое средство управления производством.

* См.: К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 23, стр. 384.

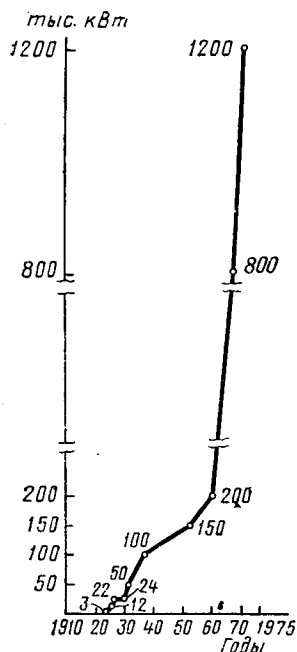


Рис. 1.1. Рост единичной мощности паровых турбин в СССР

Общество находится в состоянии постоянного развития. Материальная база такого развития обеспечивается техникой. В свою очередь и общество, его организация и структура влияют на технику.

Техника, являясь элементом производительных сил, органически связана со способом производства, который включает в себя и производственные отношения людей. Как известно, производительные силы и производственные отношения определяются законом соответствия производственных отношений характеру производительных сил. Поэтому нельзя правильно понять развитие техники без изучения смены производственных отношений.

Теперь, понимая, для чего и как создается техника, зная влияние условий, в которых она существует и развивается, можно дать развернутое определение техники: техника — это вся совокупность средств труда, создаваемых человеком на основе использования познаваемых им законов природы для удовлетворения материальных и культурных потребностей общества.

Наука, изучающая закономерности развития техники, называется историей техники. История техники — одновременно техническая и общественная наука, так как она исследует развитие техники в тесной взаимосвязи с развитием общества. В отличие от буржуазной историко-технической науки марксистская история техники объясняет отдельные открытия и изобретения как форму проявления объективных закономерностей, определяющих пути развития техники.

Техника находится в состоянии постоянного и непрерывного развития; изменяются как количество технических объектов, так и их качество, происходит замена устаревших технических объектов новыми. Возникает вопрос: являются ли происходящие изменения случайными или же они служат внешним проявлением закономерного развития? Чтобы ответить на него, необходимо за совокупностью разнообразных изменений увидеть общие свойства, присущие каждому из них. Таким общим свойством явлений служит их координация во времени. Техника изменяется во времени, а изменению свойственна такая характеристика, как скорость. Если, например, проследить характер роста единичной мощности паровых турбин в нашей стране, то он будет отражаться кривой (рис. 1.1), близкой

к закону геометрической прогрессии. Подобной кривой характеризуется и обобщенный количественный показатель роста мирового промышленного производства, отражающий динамику техники.

Рассмотренные примеры показывают, что для техники, создаваемой человеком на основе познания законов природы или, иными словами, на основе развития науки, остаются справедливыми слова Энгельса: «...наука движется вперед пропорционально массе знаний, унаследованных ею от предшествующего поколения, следовательно, при самых обыкновенных условиях она также растет в геометрической прогрессии» *.

Показатели количественных изменений в виде ежегодного процента прироста широко применяются как для оценки темпов развития отдельных областей техники, так и для ее роста по суммарному показателю — приросту объема промышленной продукции. Экстраполяция статистически обоснованных кривых развития может служить основой для прогнозирования развития техники или отдельных ее отраслей. Таким образом, исследуя качественные и количественные пути развития техники в прошлом и изыскивая для них конкретные показатели, мы получаем возможность прогнозировать будущее. А это особенно важно в условиях современной научно-технической революции.

ВЛИЯНИЕ ЗАКОНОВ ПРИРОДЫ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ НА РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ

Количественные показатели развития техники дают возможность проследить, как влияют законы природы и общественные экономические законы на эволюцию техники.

Качественный уровень техники, конструктивные формы технических объектов определяются степенью познания законов природы. Поэтому техника безразлична к классам и нациям. Отсюда — тождественность конструктивных форм, изыскиваемых деятелями техники разных стран различных общественных формаций при использовании ими одних и тех же законов природы. Поэтому, например, основные конструктивные черты паровых турбин Ленинградского металлического завода им. XII съезда КПСС не отличаются от турбин «Дженерал Электрик» (США).

Если конструктивные формы техники определяются законами природы, то темпы, направление развития определяются, главным образом, общественными законами. В странах социализма налицо плановый характер развития техники, все достижения науки и техники направлены на удовлетворение растущих потребностей общества. В капиталистических странах подъемы в развитии техники сменяются спадами, экономические кризисы сотрясают производство, научно-технический прогресс используется в интересах крупнейших монополий для ограбления трудящихся.

* К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. I, стр. 568.

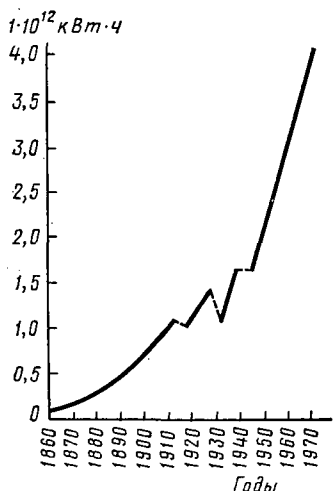


Рис. 1.2. Развитие мировой энергетики с 1860 г.

Общественный строй, конечно, влияет и на качественный уровень развития техники, но это влияние не является определяющим. Так, стремление к облегчению труда и его безопасности, характерное для техники социалистических стран, накладывает свой отпечаток на конструктивные формы машин. Общественный строй социалистических стран способствует развитию более интенсивных научных исследований, дальнейшему познанию законов природы и использованию их в интересах народа.

Фактические темпы развития производства позволяют сделать выводы об определяющем влиянии общественных законов на темпы развития техники. Так, на примере развития угольной промышленности Англии за 150 лет (1800—1950 гг.) можно показать,

что внедрение новой техники вызывало заметный рост добычи угля, и с середины XIX в темпы развития становятся достаточно стабильными. Однако обострение империалистических противоречий в первой половине XX века, экономические кризисы, массовые забастовки шахтеров приводят к постоянной депрессии, в результате которой добыча угля в 1950 г. не достигла уровня 1900 г.

Приведенный пример — один из многих, показывающих, как переход капитализма в его последнюю стадию — империализм начинает тормозить развитие производительных сил общества. Общественные условия затормозили возможности использования законов природы, внедрения прогрессивных высокопроизводительных машин, механизации и оказали определяющее влияние на развитие техники.

Аналогичным наглядным примером может служить развитие энергетики мира за последние 100 лет, начиная с 1860 г. и до наших дней (рис. 1.2). С 1860 по 1914 г. развитие идет плавно, и ежегодный прирост составляет около 4,5%. Война 1914—1918 гг. резко снизила темпы развития энергетики; послевоенный рост был замедлен, а кризис 1929—1933 гг. отбросил ее к уровню 1912 г. Заметный подъем послекризисного состояния был недолг: война 1939—1945 гг. снова приостановила рост энергетики.

Следует отметить, что на темпы развития техники влияет и степень познания законов природы, но это влияние не является определяющим.

Совершенно ложны и не убедительны попытки ряда буржуазных экономистов выдать снижение темпов промышленного производства в капиталистических странах за признак наступающего снижения потребностей как следствие «насыщения» членов общест-

ва всем потребным для жизни, в то время как миллионы безработных и полубезработных лишены самого необходимого.

Исследование перспектив развития производства в социалистических и капиталистических государствах показывает, что уровень промышленного производства социалистической системы с ее более высокими темпами развития неизбежно превзойдет уровень капиталистического производства.

О превосходстве социалистической системы хозяйства над капиталистической наглядно свидетельствуют более высокие темпы роста производительности труда, которая, как указывал В. И. Ленин, есть «самое важное, самое главное для победы нового общественного строя» *. Так, за 1951—1970 гг. среднегодовые темпы роста производительности труда в промышленности СССР были в 1,9 раза выше, чем в США, и в 2,5 раза выше, чем в Англии. В девятой пятилетке около четырех пятых прироста национального дохода получено за счет повышения производительности общественного труда.

ОРУДИЯ И МАШИНЫ КАК СРЕДСТВА УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА

Производительность труда — одна из форм проявления неразрывного единства между качественными и количественными факторами в развитии техники, а в последнее время в связи со все углубляющимся взаимопроникновением науки в технику, — существенный качественный показатель и в развитии науки.

Повышение производительности труда достигается применением орудий и машин. Но орудие в состоянии выполнять только единичную узкую функцию: резать, дробить, распиливать, тогда как производственная деятельность значительно шире и включает в себя пять основных функций: транспортную, технологическую, энергетическую, контрольно-управляющую и логическую. Простейшая из них — транспортная — состоит в перемещении тел в пространстве. Вторая, более сложная, — технологическая; ее назначение заключается в изменении формы или свойств предмета труда (резанием, дроблением, ковкой, прокаткой, закалкой, отжигом и т. п.). Перемещения или изменения, лежащие в основе транспортной и технологической функций труда, могут быть осуществлены только при затрате энергии. Поэтому человек, работая вручную, одновременно выполняет и третью — энергетическую функцию, являясь живым двигателем. Четвертая функция — контрольно-управляющая, проявляется как форма связи объективного процесса труда с логическим аппаратом работника. Сам же логический аппарат выполняет особую ему присущую логическую функцию, которая в отличие от четырех предыдущих не связана во времени с процессом труда и может протекать как до его начала, когда обдумывается предстоя-

* В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 39, стр. 21.

ший ход процесса и предвидятся его результаты, так и после его окончания, когда анализируются эти результаты.

Выделение из процесса труда указанных основных функций дает возможность понять назначение машин, состоящее в частичной или полной замене работника.

Так, транспортные машины — локомотив, автомобиль, кран, лифт и т. п. — заменили человека в выполнении транспортных функций. Технологические машины, станки самого разнообразного назначения взяли из рук рабочего орудие (резец, пилу, нож и т. п.), многократно увеличили его и, кроме того, сделали возможным работу многими орудиями одновременно. Ручной труд выполнялся лишь с помощью рук, технологические же машины заменили искусные руки рабочего, его пальцы, например, в ткацких прядильных машинах. Энергетические машины вместо человека привели в движение разнообразные транспортные и технологические машины. Автоматические устройства приняли на себя выполнение контрольно-управляющих функций человека в управлении работой транспортных, энергетических и технологических машин.

В настоящее время быстро развиваются машины, которым поручается заменять человека в выполнении ряда формально-логических функций: запоминание, систематизация, отбор, решение сложных математических уравнений. Современные электронные вычислительные машины (ЭВМ), кибернетические устройства применяются не только для осуществления контроля и управления, но и для решения самостоятельных задач.

Классификация машин по их назначению приведена в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Функция	Назначение	Машина
Транспортная	Перемещение	Транспортная: а) более подвижная (локомотив); б) менее подвижная (лифт, кран)
Технологическая	Изменение (формы, свойств) предмета труда	Технологическая: а) с частичной заменой работника; б) с полной заменой работника
Энергетическая	Преобразование, трансформация энергии	Энергетическая: генератор или двигатель
Контрольно-управляющая	Управление и контроль за работой транспортных, технологических и энергетических машин	Система автоматического контроля и управления
Логическая	Выполнение формальных логических функций	Электронные вычислительные машины, кибернетические устройства

Машина повышает производительность труда и облегчает труд человека. В погоне за максимальной прибылью капиталист, применяя машины, интенсифицирует труд, доводя его до изнурительных

пределов. Вследствие этого создается впечатление, что в капиталистических условиях машина не облегчает труд человека. Однако дело не в машине, а в том, как ее использовать. Одна и та же машина в капиталистических и социалистических условиях может либо уменьшить, либо увеличить затрату энергии рабочим в течение равновеликого рабочего дня. Но и в том, и в другом случаях машина уменьшает затрату энергии на единицу продукции.

Итак, в отличие от орудия, дополняющего естественные органы человека, машина частично или полностью заменяет его в выполнении тех или иных трудовых функций, облегчая труд и увеличивая его производительность.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ

Производительность труда служит самым общим качественным показателем уровня развития техники. Этот показатель непосредственно связан с другими — производительностью машины, выражающейся в количестве вырабатываемого ею продукта в единицу времени.

Производительность машин, а вместе с ней и производительность техники в целом постоянно растут. Качество машины можно оценить ее производительностью. Но производительность, в свою очередь, является следствием ряда факторов, наиболее существенные из которых — интенсивность, напряженность работы. Интенсивность работы машин достигается увеличением скорости движения, концентрации и интенсификации механических, физических и химических процессов.

Конкретные проявления интенсивности действия машин весьма разнообразны. На рис. 1.3 показаны рост паропроизводительности, котельного давления и перегрева пара котлоагрегатов в СССР. Повышение давления, температуры, скорости газов и т. п. приводит к увеличению удельного паросъема, к более напряженной работе материала машин, уменьшению их веса на единицу производимой продукции, т. е. к уменьшению удельной металлоемкости.

Итак, одним из качественных показателей развития техники служит интенсивность работы устройств, определяемая давлением, температурой, скоростью (объекта или физической среды), напряжением (материала, тока) и др. Из статистических данных видна тенденция роста приведенных величин. Для отдельных установок можно привести некоторые примеры: давление пара выросло с 1 до 300 ат, температура — от 100 до 650° С, напряжение тока в линиях передач — от десятков до 750 000 и 1 150 000 В, скорость транспортных средств — от 20—30 км/ч до тысяч километров в час и т. д.

Другим качественным показателем развития техники является коэффициент полезного действия, позволяющий оценить совершенство машин. Можно показать, что к. п. д. машин имеет тенденцию роста (рис. 1.4). Как правило, после достижения 95% к. п. д. растет замедленно, плавно, и хотя рост к. п. д. может происходить и скачкообразно вследствие влияния отдельных случайностей, общий

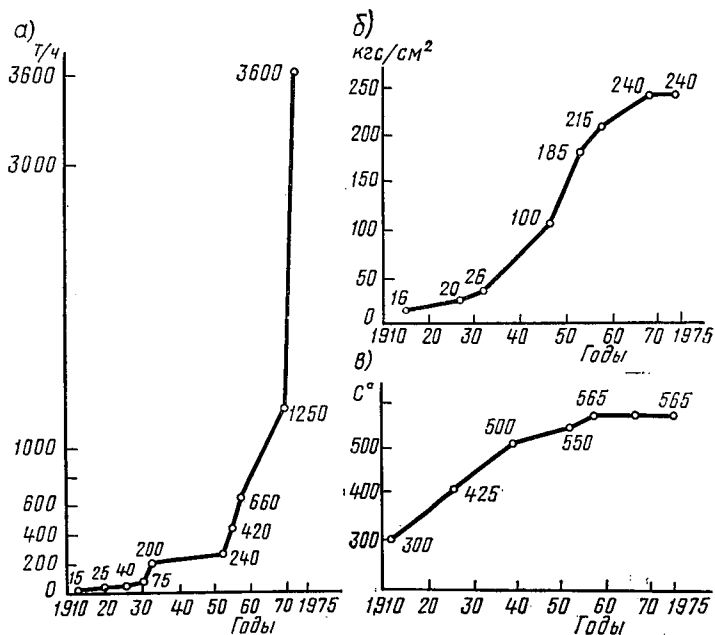


Рис. 1.3. Рост паропроизводительности (а), котельного давления (б) и перегрева пара (в) котлоагрегатов в СССР

характер зависимости, представленный на рис. 1.4, закономерен, так как степень использования того или иного закона природы

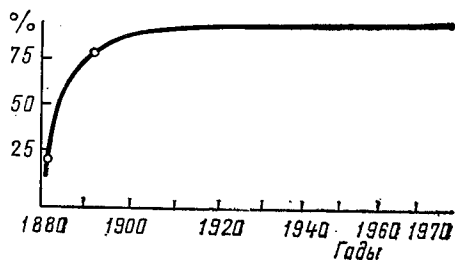


Рис. 1.4. Рост к. п. д. линий дальних электропередач

ограничена определенным пределом: 100-процентным (на практике недостижимым) использованием.

По-видимому, здесь возникает новая проблема, для решения которой имеются необходимые предпосылки. Маркс писал: «...человечество ставит себе всегда только такие задачи, которые оно может разрешить, так как при ближайшем рассмотрении всегда оказыва-

ется, что сама задача возникает лишь тогда, когда материальные условия ее решения уже имеются налицо, или, по крайней мере, находятся в процессе становления» *.

В ряде случаев кардинальное решение задачи состоит в обращении к использованию других закономерностей природы, к приме-

* К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 13, стр. 7.

нению новых машин. Так, например, паровоз заменяется тепловозом и электровозом. И хотя коэффициент полезного действия тепловых станций еще повышают путем введения более высоких параметров (интенсификации), но и здесь уже намечаются решения на основе использования новейших достижений техники.

Стабилизация значений к. п. д. машин при резком росте потребления вырабатываемой ими продукции служит признаком возникновения тенденции перехода к принципиально новым машинам, создаваемым на основе иных законов природы.

Знание показателей качественного развития техники весьма существенно. Но односторонне оценивать качественный прогресс техники только значениями к. п. д. нельзя. История техники знает немало случаев, когда правильное экономическое решение направлялось на повышение интенсивности в ущерб к. п. д. Примером может служить переход от водяных колес с к. п. д. порядка 60—70% к паросиловым установкам с к. п. д. 0,6% в XVIII в. Этот шаг был обусловлен стремлением сделать энергетические установки независимыми от местных условий. При этом повышался показатель интенсивности, выражавшийся в энергоемкости носителя энергии природы.

В последнее десятилетие в СССР преимущественное развитие получают тепловые электростанции по сравнению с гидравлическими. И хотя коэффициент полезного действия последних выше, а себестоимость выработанной энергии ниже, сооружение тепловых станций позволяет вести более интенсивное энергостроительство, что для нашей страны в настоящее время экономически более целесообразно.

РОЛЬ ЛИЧНОСТИ В РАЗВИТИИ ТЕХНИКИ

Какова роль личности в развитии техники? Большинство буржуазных историков техники считают изобретения плодом гениальных умов, а в качестве метода изобретательного творчества выдвигают случай. Так, по их представлениям, понятие о гальваническом токе возникло от случайного наблюдения Гальвани за лапкой препарированной лягушки; паровой двигатель с отделенным конденсатором был создан благодаря случайному наблюдению Уатта за клубами пара, выходявшего из окон прачечной, и т. п. При таком подходе путают следствие с причиной, отходят от материалистического закона причинности, трактуя случайное как форму проявления необходимого.

В действительности все изобретения вызваны объективной необходимостью, вытекающей из первичной движущей силы развития общества, и, в частности, для техники — из потребности в материальных благах. К. Маркс писал: «Критическая история технологии вообще показала бы, как мало какое бы то ни было изобретение XVIII столетия принадлежит тому или иному отдельному лицу»*.

* К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 23, стр. 383.

История энергетической техники, как это будет видно из последующих глав, показывает, что в XIX и в XX вв. крупные вклады в технику делались приблизительно в одно и то же время многими изобретателями независимо друг от друга.

Это объясняется только тем, что совершенно объективно и независимо от воли изобретателей возникает потребность в продукте их творчества: электропередаче, паровой турбине, двигателе внутреннего сгорания и т. п. Следовательно, для понимания субъективной деятельности изобретателя нужно прежде всего оценить объективные условия, поставившие перед ним определенную задачу, так как при этом создаются объективные материальные предпосылки ее решения, а субъективные качества изобретателя дают возможность увидеть и решить эту задачу.

Потребность общества в материальных благах выявляется в форме постоянно возникающего и постоянно разрешаемого противоречия между потребностью в материальных благах и возможностью ее удовлетворения. В свою очередь противоречия между потребностями общества и возможностью их удовлетворения приводят к возникновению кризиса существующего способа производства. Так, в XVIII в. гидроэнергетика оказалась неспособной удовлетворить возросшие потребности промышленности в механической энергии. В результате этого десятки изобретателей вложили свой труд в изобретение парового двигателя. В XIX в. возник кризис существовавшего механического способа передачи энергии от ее источников к потребителям. Он направил творчество изобретателей на разработку различных методов передачи энергии, среди которых наилучшие результаты дал электрический. Во второй половине XX в. зреет кризис энергетики в связи с ограниченностью ресурсов органического топлива, особенно в ряде районов земного шара, и недостаточностью водных источников при громадном потреблении энергии. Это стимулирует исследования ученых и инженеров в поиске путей использования ядерной энергии.

Противоречия, подобные описанным, всегда возникали и возникают в отдельных отраслях техники. Но история техники знает и такие переломные моменты своего развития, когда указанное противоречие распространялось на технику в целом, на весь связанный с ней способ производства, вызывало общий кризис, приводило к смене методов производства (например, промышленный переворот XVIII в.).

Между отдельными составляющими элементами техники в целом (отраслями, объектами, процессами и т. п.) существует постоянная взаимосвязь и взаимообусловленность. Так, в современном газотурбиностроении и металлургии качество жароупорных материалов тормозит возможный рост к. п. д. газовых турбин за счет повышения начальной температуры газа, так же как качество изоляционных материалов тормозит развитие электротехники, задерживая переход к более высоким напряжениям.

Подобные примеры можно приводить без конца. Всегда имеется какое-то «узкое место», задерживающее развитие данного объекта,

процесса, отрасли. Тем не менее такого рода торможения — вполне конкретные проявления движущей силы развития техники. Они направляют и стимулируют деятельность людей на ликвидацию постоянно возникающих «узких мест», являющихся частными формами кризисов в развитии техники.

Таким образом, движущие силы развития техники проявляются в ряде зримых, иногда весьма острых противоречий и кризисов, формирующих социальный заказ изобретателю. Если изобретатель не видит социального заказа, то его изобретение как не направленное на решение объективно возникшей задачи, обречено на гибель.

Так, в XVII в. итальянец Д. Бранка предложил активную паровую турбину. Но для привода медленно действующих пестов быстроходная паровая турбина была не нужна. Изобретатель предусматривает тройной редуктор. Но для эффективной работы турбины была необходима такая скорость вращения, которую деревянная конструкция Бранка не смогла бы выдержать.

Социальный заказ во многих случаях проявляется весьма остро. Так, во время кризиса гидроэнергетики в XVIII в. разоряемые шахтовладельцы объявляли большие премии тем, кто найдет новые методы откачки грунтовых вод. В конце XVIII в. потребность в паровом двигателе с вращательным движением вала стала настолько необходимой, что один из современников писал о том, что от такой машины все «без ума». В середине XIX в. возникла необходимость в экономичном и дешевом двигателе небольшой мощности; в частности, это нашло отражение в ряде опубликованных статей на характерную тему: «Двигатель — спаситель ремесла». Прогрессивная роль передового деятеля науки и техники заключается в том, что он находит решение задачи, объективно возникшей в процессе развития общества.

Когда новые технические решения еще не соответствуют материально-техническим возможностям общества, между провозглашением нового принципа и его реализацией проходит более или менее длительный срок. Так, запуск первых искусственных спутников Земли был осуществлен на основе принципов, разработанных К. Э. Циолковским более чем за полвека до их осуществления.

Субъективная способность видеть и задачу, и методы ее решения воспитывается условиями жизни и деятельности изобретателя, его образованием, пройденной им школой. В новаторской, изобретательской деятельности все большее значение приобретает специальное образование.

При всем разнообразии работу изобретателя, новатора, можно свести к небольшому числу возможных областей этой деятельности: изысканиям нового технического объекта для удовлетворения материальных и культурных потребностей, нового способа получения ранее использовавшихся материальных благ, а также путей более эффективного их производства. Общая эффективность включает в себя конкретные частные формы: увеличение производительности труда, интенсификацию производственных процессов, повышение

к. п. д.

Оценивая открытие или изобретение, необходимо руководствоваться указанием В. И. Ленина о том, что «исторические заслуги судятся не по тому, чего *не дали* исторические деятели сравнительно с современными требованиями, а по тому, что они *дали нового* сравнительно с своими предшественниками»^{*}.

В деятельности новатора техники большое значение имеет не только умение видеть ростки нового, но и правильно оценивать старое, отживающее. В процессе развития техники происходят постоянные замены одного вида технических объектов другими, более соответствующими новым потребностям. В период своего возникновения эти объекты ускоряли промышленный прогресс, но с течением времени они стали тормозить его дальнейшее развитие, несмотря на то, что постоянно совершенствовались. Современный паровоз, например, во много раз мощнее, быстрее и экономичнее паровозов Стефенсона или Черепановых. Но если те паровозы являлись новым шагом в развитии транспортной техники, то современные снимаются с производства, ибо они уже тормозят технический прогресс. Следовательно, в отличие от живых существ технические объекты отмирают в момент своего наивысшего расцвета. Понимание этого процесса позволяет легче преодолеть старые традиции в отношении технических объектов, которым иногда отданы многие годы творческой деятельности, помогает легче отказаться от них, если они не имеют перспектив развития в будущем.

* *
*

Изучая развитие той или иной отрасли техники, необходимо понимать, что периодизация развития техники соответствует периодизации общественно-экономических формаций. Как указывал Маркс, «экономические эпохи различаются не тем, что производится, а тем, как производится, какими средствами труда»^{**}. Поэтому можно говорить о технике докапиталистических формаций, технике в период победы и утверждения капитализма, технике в период монополистического капитализма и технике социалистического и коммунистического общества.

По своей структуре техника состоит из ряда отраслей, среди которых наиболее крупными являются металлургия, энергетика, машиностроение. Перечисленные отрасли выражают три существенных элемента техники: материалы (на что воздействует техника), энергию (чем воздействует техника) и технологию (как воздействует техника). Изменения в этих элементах в процессе исторического развития наступали не одновременно, они происходили в недрах общественно-экономических формаций, развивались в связи с эволюцией других областей техники, пока не возникало острого несоответствия с существующей общественно-экономической фор-

^{*} В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 2, стр. 178.

^{**} К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 23, стр. 191.

мацией, приводящего к революционной замене ее новой формацией. Поэтому при изучении развития техники важно установить исторические моменты качественных изменений в отдельных крупнейших областях техники: энергетике, машиностроении и др. В следующей главе периоды развития энергетической техники будут рассмотрены более подробно.

Чтобы более четко представить особенности развития техники, рассмотрим кратко периодизацию развития орудий и машин и качественные ступени развития техники.

Для исторического процесса развития орудий и машин характерна тенденция замены человека-исполнителя машинами. В развитии этой тенденции отчетливо выступают отдельные качественные периоды:

1. Весь комплекс многообразных составляющих физической и интеллектуальной деятельности человека в производстве материальных благ выполняется самим человеком, использующим разнообразные орудия труда.

2. Человек заменяется транспортными машинами, приводимыми в движение живым двигателем (прирученные животные).

3. Человек в выполнении им функции двигателя заменяется энергетическими машинами.

4. Человек заменяется машиной, выполняющей технологические функции, требующие от исполнителя навыков, умения, квалификации (замена рук рабочего машиной и передача машине орудия).

5. Человек заменяется автоматизированными системами машин, выполняющими функции контроля и управления производственным процессом и поддержания этого процесса в заданном режиме.

6. Человек заменяется вычислительными машинами и кибернетическими устройствами, которые выполняют ряд логических операций.

По мере развития науки и техники человек будет создавать еще более совершенные автоматические устройства, которые воспримут от него исполнение многих логических функций. Но какой бы совершенной ни была машина, она никогда не заменит человека-творца, не исключит его из сферы производства.

Последовательная передача производственных функций техническим средствам является одной из основных закономерностей технического прогресса, указанной К. Марксом и В. И. Лениным: «...прогресс техники, — писал В. И. Ленин, — в том и выражается, что человеческий труд все более и более отступает на задний план перед трудом машин»*.

Передача транспортных, энергетических, технологических, контрольных и, наконец, логических функций от человека к машине позволяет существенно повысить производительность труда и создать предпосылки к удовлетворению потребностей общества в материальных благах.

* В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 1, стр. 78.

Главное содержание современной эпохи — переход от капитализма к социализму и коммунизму. Это закономерный процесс продвижения человечества на новую, более высокую ступень развития. Поэтому технику наших дней можно считать техникой переходного периода, которая становится все менее соответствующей капиталистическому обществу и все более приближающейся к технике коммунистического общества.

Развитие техники после Великой Октябрьской социалистической революции характеризуется переходом к автоматической системе машин [30, 95]. За последние десятилетия в условиях современной научно-технической революции сделан гигантский скачок в развитии автоматизации, который привел к широкому внедрению автоматизированных систем управления производственными процессами.

Решающая роль в развитии автоматизации и эффективном применении новой техники принадлежит электрификации.

Капиталистические производственные отношения приходят в непримиримые противоречия с достижениями и возможностями научно-технического прогресса. Гигантские производительные силы, заложенные в современной технике электрификации, по образному выражению Энгельса, все более выходят из-под управления буржуазии.

Только в социалистическом обществе открываются безграничные возможности для развития научно-технического прогресса. Электрификация играет главную роль в создании материально-технической базы коммунизма. В своей классической формулировке: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны»*, — В. И. Ленин подчеркнул, что именно электрификация характеризует качественно новую, передовую технику будущего.

Советский народ, построив развитое социалистическое общество, успешно осуществляет создание материально-технической базы коммунизма. Органическое соединение достижений научно-технической революции с преимуществами социалистической системы хозяйства позволяет эффективно внедрять в производство элементы новейшей техники, техники коммунистического общества.

* В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 42, стр. 159.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ЕЕ РОЛЬ В РАЗВИТИИ ОБЩЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА. ИСТОРИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Материальная жизнь общества всегда была связана с двумя основными началами: веществом и энергией. Поэтому все техническое творчество человека на всех этапах развития общества сводилось, по существу, к видоизменениям и превращениям как вещества, так и энергии. Поскольку под энергией понимают способность тел совершать работу, то физической основой энергетической техники является движение, переходящее из одной формы в другую.

Под энергетической техникой понимают совокупность средств производства, преобразования, передачи и распределения между потребителями различных форм энергии.

Фундаментальной теоретической основой энергетической техники является закон сохранения и превращения энергии. Роль энергетической техники в развитии общества настолько велика, что даже отдельные периоды человеческой истории связывали с энергетикой. Вспомним знаменитые выражения Маркса о веке пара, об электрической искре, идущей на смену пару, ленинские слова об электрификации и ее месте в построении коммунистического общества.

В этой книге последовательно рассмотрены все этапы развития энергетической техники: от ранней энергетики, связанной с мускульными усилиями человека и животных (биоэнергетика), до современной комплексной энергетики, объединяющей основой которой является электрификация. Каждый переломный момент в истории энергетической техники был связан с качественными изменениями во всей системе производительных сил общества, раскрывая новые возможности повышения производительности труда.

Известно, что общественно-экономические формации отличаются средствами труда, которыми производятся материальные блага. Поэтому правомерно рассматривать энергетическую технику в связи со способом производства и общественно-экономическим строем.

В период первобытно-общинного строя единственным источником энергии являлись мускульные усилия человека. Освоение огня затем дало человеку источник тепловой энергии. Это было величай-

шим завоеванием человечества. Ф. Энгельс писал: «На пороге истории человечества стоит открытие превращения механического движения в теплоту: добывание огня трением; в конце протекшего до сих пор периода развития стоит открытие превращения теплоты в механическое движение: паровая машина. — И несмотря на гигантский освободительный переворот, который совершает в социальном мире паровая машина, — этот переворот еще не закончен и наполовину, — все же не подлежит сомнению, что добывание огня трением превосходит паровую машину по своему всемирно-историческому освободительному действию. Ведь добывание огня трением впервые доставило человеку господство над определенной силой природы и тем окончательно отделило человека от животного царства»*.

Лишь на поздних стадиях, уже на подступах к веку металла, начинается использование прирученных и одомашненных животных — слонов, волов, лошадей, верблюдов. Биознергетика, энергетика мускульных усилий, господствовала многие тысячелетия. Она сохраняла свои позиции и в эпоху рабовладельческого общества, в котором труд раба ценился не выше, чем работа животных. В эпоху расцвета античной культуры, когда строились прекрасные дворцы и храмы, пирамиды и дороги, эти колоссальные работы выполнялись рабами, огромными массами, сгонявшимися на строительство. Лишь когда концентрация мускульных усилий не в состоянии была решить техническую задачу (например, подъем больших тяжестей на значительную высоту), применяли изобретения древних механиков: блок, полиспаст, рычаг, наклонную плоскость и т. п.

Применение в рабовладельческий период (например, в I в. до н. э. в Александрии) водяных колес для орошения, а затем на мельницах, равно как и ветродвигателей, не вызывало еще сколько-нибудь серьезных изменений в общем уровне энергетической техники. Заметный эффект в повышении продуктивности сельскохозяйственного производства дало подковывание лошадей (начало X в.) и улучшение сбруи тягловых животных (XI в.). В результате этих нововведений удалось создать колесный плуг — намного тяжелее прежнего, глубже проникающий в землю и, следовательно, обеспечивающий лучшую вспашку.

Только в XI в., в эпоху феодального средневековья, в Европе начинают распространяться водяные и ветряные мельницы. Водяное колесо дало мощный толчок развитию металлургии, поскольку, во-первых, удалось повысить температуру в доменных печах, мехи которых приводились в движение от водяного колеса; во-вторых, расширились возможности откачки воды из шахт с помощью насосов, которые также приводились в движение от водяных колес. Начиная примерно с XIII в., водяное колесо становится устройством, характеризующим технический уровень энергетической техники вплоть до промышленного переворота в конце XVIII столетия.

* Ф. Энгельс. Анти-Дюринг. Политиздат, 1970, стр. 112—113.

Капиталистический способ производства вызвал к жизни новую энергетическую технику, основой которой стала паровая машина. Изобретение универсального парового двигателя явилось вторым этапом промышленного переворота XVIII в., открывшего эпоху капитализма. На смену ранней гидроэнергетике пришла теплоэнергетика. Тепловая энергия, впервые сослужившая исключительную по своим последствиям службу человеку в период освоения огня, дала новый толчок в развитии человеческого общества.

Развитие энергетической техники протекало во взаимосвязи с развитием машин — орудий и характеризовалось непрерывным нарастанием единичных мощностей энергетических установок. В XVIII в. в Англии была введена Уаттом единица измерения мощности «лошадиная сила», которая отражала реальные возможности одного из самых распространенных биологических «двигателей» прошлого — конного привода. Единица мощности была определена исходя из работы, совершенной насосом, приводившимся в действие конной тягой, который откачивал воду из шахты в течение рабочего дня.

Лучшие водяные и ветряные колеса средневековья достигали мощности 40—60 л. с. Паровые машины уже на заре своего развития имели мощность, измерявшуюся единицами, а затем несколькими десятками лошадиных сил, автомобильные двигатели внутреннего сгорания имеют мощность десятки и сотни лошадиных сил, паровые и гидравлические турбины современных электростанций обладают мощностью в десятки и сотни тысяч лошадиных сил (1 л. с. = 0,736 кВт), а реактивные двигатели космических кораблей развивают мощность в несколько миллионов лошадиных сил.

Электрификация — стержень современной энергетической техники. Однако следует иметь в виду, что лишь весьма незначительная часть первичной, главным образом тепловой и гидравлической энергии преобразуется в электрическую (примерно 3%). Если взглянуть на диаграмму, отражающую с некоторыми приближениями состояние современного энергетического баланса (рис. 2.1), то становится ясной роль тепловой энергии в энергетической технике. Тепловая энергия составляет огромную долю (97,6%) всей энергии, получаемой человеком от природы при сжигании различных видов топлива. Сюда же можно отнести и ту пока еще незначительную в общем энергобалансе часть тепловой энергии, которая получается в атомных реакторах, представляющих новый этап энергетической техники.

ПЕРИОДЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Качественные ступени развития энергетики можно представить в следующем виде:

1. Биоэнергетика — использование в качестве источника механической работы биологической энергии человека и животных.

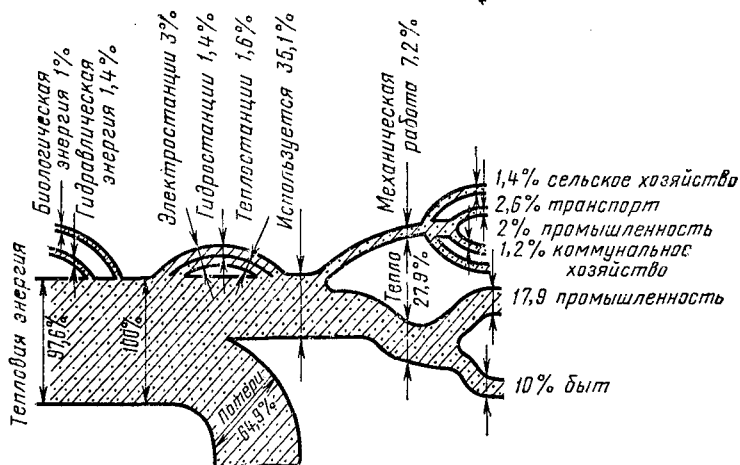


Рис. 2.1. Диаграмма распределения видов энергии в мировом энергобалансе

2. Механическая энергетика — использование механической энергии потоков воды и воздуха.

3. Теплоэнергетика — использование в качестве источника механической работы теплоты, выделяющейся при сжигании топлива.

4. Современная комплексная энергетика — преимущественное использование в качестве первичной энергии тепловой и гидравлической, а в качестве вторичной — электрической энергии.

5. Атомная энергетика — использование энергии ядерных реакций.

Для каждой из перечисленных ступеней развития энергетики характерен некоторый количественный показатель. Для одних из них таким показателем является удельная энергоемкость носителя энергии, выражаемая отношением количества механической работы в джоулях к единице массы энергоносителя. Для живых двигателей он неприменим вследствие особых форм выполняемости живого энергоносителя за счет биологической энергии. Тем не менее в отдельных случаях в косвенной форме энергоемкость живых двигателей может быть успешно привлечена для оценки исторических ступеней развития энергетики. Так, например, если для современного океанского судна водоизмещением 80 000 Т использовать вместо двигателя мускульные усилия людей, как это делалось в античном мире, то для мощности 70 000 л. с. потребовалось бы свыше 2 млн. гребцов (при трехсменной работе), вес которых без багажа и запасов продовольствия в несколько раз превысил бы вес судна.

Что касается энергоносителей неживой природы, то здесь показатель удельной энергоемкости выражается достаточно точными цифрами и позволяет не только объяснить исторические факты, но и сделать прогнозы на будущее. Носитель гидроэнергии — вода —

располагает запасом энергии в зависимости от возможной высоты падения. Так, 1 кг воды может располагать энергией в 10, 100, 1000 Дж или, скажем, 10 000 Дж. Меньшей энергоемкостью обладает носитель ветровой энергии — воздух, энергоемкость которого к тому же постоянно и бессистемно изменяется в зависимости от скорости ветра.

Удельная энергоемкость 1 кг топлива лежит в пределах 8380—46 000 кДж/кг или в среднем около 30 000 кДж/кг. Даже если учесть, что к. п. д. тепловых установок в среднем примерно в 3 раза ниже к. п. д. гидравлических, высокая энергоемкость горючего дает выход энергии в десятки тысяч раз больший, чем энергоемкость воды.

Энергоемкость электрической энергии — понятие несколько условное, поскольку эта энергия вторичная. Во всех случаях получения электроэнергии ее количество, относимое к весу генерирующего устройства (паротурбогенератор, дизель-генератор, гидрогенератор, гальваническая или аккумуляторная батарея), незначительно. Поэтому с позиций удельной энергоемкости электрическая энергия не играет такой роли, как тепловая, являющаяся в настоящее время в силу высокой энергоемкости топлива монопольной для водного и воздушного транспорта и преобладающей для наземного.

Использование ядерной энергетики с позиций удельной энергоемкости, безусловно, знаменует громадный скачок к новой качественной ступени развития энергетики. Удельная энергоемкость ядерного горючего выражается в среднем в $85 \cdot 10^{12}$ Дж/кг по ядрам тяжелых изотопов и $630 \cdot 10^{12}$ Дж/кг по термоядерным реакциям, что в миллионы раз превышает среднюю энергоемкость обычного горючего. Даже если принять возможным использование только 10% энергии ядерного горючего, энергоемкость носителей ядерной энергии более чем в миллион раз превосходит энергоемкость обычных видов топлива. Практическое применение ядерного горючего означает начало эры энергетики, совершенно независимой от местных условий, когда каждый энергопотребляющий объект в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и быту будет обеспечен громадными количествами необычайно концентрированной атомной энергии, расходуемой в самых разнообразных целях: нагрева, охлаждения, кондиционирования, связи, транспорта, привода орудий и машин.

Итак, в развитии энергетики должны быть отмечены следующие ступени, характеризующие резкое отличие применяемых форм энергии по весовой энергоемкости.

1. Использование первичной механической (гидравлической и — в меньшей степени — ветровой) энергии с энергоемкостью порядка 100—10 000 Дж/кг.

2. Использование первичной тепловой энергии с энергоемкостью $30 \cdot 10^6$ Дж/кг.

3. Использование первичной ядерной энергии с энергоемкостью $85 \cdot 10^{12}$ — $630 \cdot 10^{12}$ Дж/кг.

СУЩНОСТЬ И ЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

Электроэнергия занимает особое место среди других энергетических источников. При этом следует выделить две стороны: техническую и социально-экономическую. В техническом отношении электроэнергия является наиболее универсальной формой энергии. Широко известны следующие замечательные свойства электроэнергии: возможность производить ее в необходимых количествах и транспортировать ее с помощью линий электропередач на большие расстояния; возможность дробить ее на любые доли с минимальными потерями; наличие удобных (тоже электрических) средств автоматизации и управления процессами производства и распределения электроэнергии; возможность легко преобразовывать электрическую энергию в любой другой вид энергии. Объективные свойства электроэнергии позволили в очень короткий исторический срок не только решить все основные вопросы собственно электроэнергетики, но и модернизировать всю «неэлектрическую» технику, перевести ее с помощью электрических средств контроля, управления, обработки информации, иначе говоря с помощью средств автоматики, телемеханики и механизированных средств обработки информации, на качественно новый уровень. Электрическая техника проникла в производство, на транспорт, в сельское хозяйство, медицину, быт, вызвала к жизни кино, радио, телевидение.

Но техническая реконструкция народного хозяйства на базе электрической техники не могла не вызвать глубоких социально-экономических преобразований. Резко повысилась производительность труда. Появилась возможность сделать труд более легким, гигиеничным, менее опасным. Следовательно, электрификация — это не только развитие комплекса сооружений и средств, необходимых для производства, распределения и использования электрической энергии, но это и наиболее мощный фактор, а в определенном смысле и символ глубоких социально-экономических преобразований.

Уже в первых опытах применения электрической энергии основоположники научного коммунизма сумели увидеть и техническую, и социальную перспективы. К. Маркс, говоря о том, что электрическая искра приходит на смену пару, имел в виду революционизирующую роль новой энергетической техники в общественном производстве.

В последней четверти прошлого столетия наиболее дальновидные ученые сумели оценить грядущую роль зарождавшейся электрической техники. Ф. Энгельс в письме к Э. Бернштейну, восхищаясь новейшими опытами по передаче электрической энергии на расстояние, писал: «Совершенно ясно, ...что благодаря этому производительные силы настолько вырастут, что управление ими будет все более и более не под силу буржуазии» *.

*К. Маркс и Ф. Энгельс Соч., т. 35, стр. 374

Исключительное значение электрификации придавал В. И. Ленин. Анализируя развитие капитализма в России в 90-х годах прошлого столетия, Владимир Ильич указывал на универсальный характер и большие возможности применения электроэнергии в промышленности и сельском хозяйстве.

Еще в своих дореволюционных трудах В. И. Ленин подчеркивал, что электрификация — основа технического прогресса. В капиталистическом обществе электрификация вызовет такой рост производительных сил, которые неизбежно придут в непримиримое противоречие с производственными отношениями, усилится гнет и эксплуатация трудящихся; только в условиях социализма возможно эффективное использование электрификации в интересах народа. В. И. Ленин определял электрификацию как основу экономического преобразования страны, которая переродит Россию.

План ГОЭЛРО, разработанный по инициативе и при личном участии В. И. Ленина, был первым в истории планом развития народного хозяйства страны на базе электрификации. Как будет показано, развитие советской энергетики и электротехники осуществлялось и осуществляется в соответствии с принципами, разработанными в плане ГОЭЛРО. Ленинские положения об электрификации, положенные в основу плана ГОЭЛРО, остаются и поныне определяющими при перспективном планировании народного хозяйства нашей страны [12, 22—24].

Начавшийся в конце XIX в. процесс электрификации дал капиталистическим монопольным объединениям новую базу для технического прогресса, которая способствовала дальнейшему развитию процесса централизации производства и обобществлению труда. Так электрификация оказалась тем троянским конем, которого, согласно образному сравнению В. Либкнехта, «буржуазное общество в самоубийственном ослеплении — как некогда троянцы и троянки — ликуя вводило в свой Илион и который нес ему с собой верную гибель».

Таким образом, позволяя широко использовать природные энергетические ресурсы, наилучшим образом размещать производительные силы, широко механизировать и автоматизировать производство, электрификация непрерывно увеличивает производительность общественного труда. И если техническая сущность электрификации практически безразлична к общественному строю, то для экономического содержания и политической оценки электрификации далеко не безразличны общественные условия, при которых она развивается.

ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Ученые и практики всех времен обращались к исследованиям различных энергетических процессов и предпринимали попытки обобщений, в которых содержались элементы формулировки закона сохранения и превращения энергии. Если обратиться к истории открытия закона сохранения и превращения энергии, то следует иметь в виду, что термин «энергия» появился лишь на последнем

этапе истории великого закона. Кроме того, следует учесть, что основные достижения физики, химии и биологии, позволившие сделать действительное обобщение, становятся известными только к начала XIX в.

Еще мыслители древности (Демокрит, Эпикур) утверждали вечность и неумножимость материи и движения. Это было весьма типичным при умозрительном характере науки: ученые, которых можно отнести к числу стихийных материалистов, формулировали на основе логических построений такие принципы и давали обобщения, которые с позиций нынешней науки могут быть оценены как гениальное предвидение. Так в древности зарождались основы не только материалистической, но и диалектической философии.

Повседневная практическая деятельность требовала познаний законов движения, прежде всего единственного известного — механического. И поэтому не случайно, что закон сохранения энергии начинал выкристаллизовываться в рамках механики. В 1633 г. в «Трактате о свете» идея сохранения движения была сформулирована Декартом следующим образом: «Когда одно тело сталкивается с другим, оно может сообщить ему лишь столько движения, сколько само одновременно теряет, а отнять от него лишь столько, на сколько увеличит собственное движение». В таком виде совершенно четко отмечается количественное постоянство движения, причем никакое другое движение, кроме механического, Декарт не рассматривал. Эта идея получила дальнейшее развитие у Лейбница в его законе сохранения живых сил.

После классических работ Ньютона и Лейбница принцип сохранения движения получил завершение в трудах М. В. Ломоносова, который решился объединить два принципа сохранения: движения и материи. Именно М. В. Ломоносову принадлежит открытие закона сохранения вещества, повторенное затем совершенно независимо от него Лавуазье. В 1744 г. М. В. Ломоносов написал ставшие знаменитыми слова «Все перемены в натуре случающиеся, такого суть состояния, что сколько чего у одного тела отнимается, столько присовокупится к другому, так ежели где убудет несколько материи, то умножится в другом месте... сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения, ибо тело, движущее своею силою другое, столько же оной у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает».

Так, в середине XVIII столетия М. В. Ломоносовым был четко сформулирован закон сохранения массы и движения как всеобщий закон природы. Более того, первая часть его выражения («все перемены в натуре случающиеся...») сформулирована так широко, что если бы эти слова были написаны столет спустя, когда стали известны другие «перемены в натуре» — многочисленные взаимные преобразования энергии (электрической, тепловой, химической, механической), то другие формулировки закона сохранения и превращения энергии и сохранения материи были бы излишни. Но, к сожалению, и эпоха была еще не та, и научные труды М. В. Ломоносова почти полтора столетия оставались неизвестными.

Энгельс в статье «Мера движения — работа» подчеркивал, что главное в законе — не количественное сохранение, а превращение энергии, являющееся качественной частью закона. Чтобы осмыслить качественные превращения энергии из одной ее формы в другую, должны были сложиться необходимые и достаточные научно-технические предпосылки.

Важнейшим среди этих предпосылок явилось развитие учения о теплоте и теплотехническая практика. Известно, какую роль в развитии человека на заре его истории сыграл огонь. Сначала огонь научились сохранять и использовать для приготовления (улучшения) пищи и согревания. В процессе трудовой деятельности человек научился добывать огонь трением. Однако этот первый факт, который следует отнести к области теплоэнергетики, практически не мог привести к мысли о превращении одного вида энергии (механической) в другой (тепловую). Вместе с тем получение огня трением для обобщений XIX в. было гораздо более важным фактом по сравнению с многовековым производственным опытом механической энергетики (ветроэнергетики и ранней гидроэнергетики), поскольку в первом случае было налицо качественное преобразование формы энергии (о чем еще не подозревали), а во втором — только преобразование вида механического движения (что было очевидным).

Установлению взаимосвязей между механической и тепловой энергией длительное время объективно препятствовала теория теплорода, хотя эта теория представляла собой первоначально значительный прогресс в развитии научной мысли. Считалось, что теплород выдавливается из вещества при его сжатии, например, при сжатии газа, как сок из апельсина. Гениальные мысли М. В. Ломоносова о молекулярном движении как источнике тепла, о кинетической природе тепла в более широком смысле оставались вне поля зрения широкой научной общественности. Наиболее ощутимый удар по теории теплорода уже в эпоху паровых машин (1798 г.) нанесли опыты американца Бенджамина Томпсона, более известного в Европе под титулом графа Румфорда. При сверлении орудийных стволов в Мюнхене Румфорд наблюдал выделение тепла, что, впрочем, было всем известно. Однако Румфорд сумел показать, что при этом может выделяться практически неограниченное количество тепла. В своих опытах он принимал меры к изоляции сверла и ствола с тем, чтобы исключить поступление теплорода, этой «субстанции теплоты», откуда-либо извне.

Но еще примерно 30 лет после опытов Румфорда теория теплорода, подправляемая и «уточняемая», продолжала занимать господствующее положение в объяснениях причины возникновения теплоты. Существенно важной для понимания факта превращения одного вида движения (например, механического) в другой (например, тепловое) была мысль об эквиваленте, в частности о механическом эквиваленте тепла. Драматизм истории открытия закона сохранения и превращения энергии состоял в том, что практически до момента полного признания этого закона почти ни одно предшествующее открытие, подтверждающее его справедливость, либо не публиковалось, либо на него не обращали должного внимания, либо оно просто встречалось в штыхы официальной наукой.

Соответствующие труды М. В. Ломоносова до 1904 г. находились в забвении, а будучи в свое время опубликованными в России, не проникли в лаборатории Запада. Румфорд, поколебав устои теории теплорода, не смог ее низвергнуть, не найдя доказательств эквивалентности превращения механического движения в теплоту. Двадцативосьмилетний французский инженер Сади Карно опубликовал в 1824 г. замечательную работу «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», в которой изложил то, что впоследствии стали называть вторым началом термодинамики или «принципом Карно». Но более поздние исследования, в которых Карно отказался от теории теплорода и определил впервые механический эквивалент тепла, своевременно не были опубликованы, и рукописи его стали известны лишь в 1878 г.

В приложении к своей единственной книге Карно писал: «Тепло — это не что иное, как движущая сила, или, вернее, движение, изменившее свой вид. Это движение частиц тел. Повсюду, где происходит уничтожение движущей силы, возникает одновременно теплота в количестве, точно пропорциональном количеству исчезнувшей движущей силы. Обратно, всегда при исчезновении теплоты возникает движущая сила.

Таким образом, можно высказать общее положение: движущая сила существует в природе в неизменном количестве; она, собственно говоря, никогда не создается, никогда не уничтожается; в действительности она меняет форму, то есть вызывает то один род движения, то другой, но никогда не исчезает».

По измерениям Карно механический эквивалент теплоты составил 370 килограммов на одну килокалорию (напомним, что эта величина составляет 427 килограммометров, или 4186 джоулей). Сади Карно был сыном своего века. Его теоретические исследования отвечали на конкретный вопрос, поставленный развивавшейся промышленностью: как сделать тепловой двигатель более экономичным. Заслуживает внимания и то, что, разрабатывая основы термодинамики, Карно исходил из невозможности осуществления вечного двигателя. Но и на его работы современники не обратили того внимания, которого они заслуживали. Понадобилось почти два десятилетия, чтобы стало возможным утверждение закона.

Исследования химических, тепловых и механических действий электрического тока в первые сорок лет XIX в. послужили второй важной предпосылкой к открытию закона сохранения и превращения энергии.

В 1800 г. был построен первый электрохимический источник электрической энергии («вольтов столб») и при помощи электричества осуществлен электролиз

воды. Было показано, что химическая реакция может быть источником электричества, а электричество, в свою очередь, может вызвать химические превращения. Так возникали основы новой науки — электрохимии.

Первые же эксперименты с электрическим током позволили обнаружить нагрев проводника (Тенар, Петров, Дэви и др.), но недостаточная точность измерений не позволила найти точные количественные связи. В 1821 г. было открыто явление термоэлектричества (Зеебек), а 13 лет спустя — обратное ему явление Пельтье.

Выдающуюся роль в развитии электромагнетизма и в формировании современных физических взглядов сыграл М. Фарадей. Еще в опытах Эрстеда (1820 г.) демонстрировалось механическое воздействие электрического тока на магнитную стрелку, но Фарадей в 1821 г. осуществил непрерывное движение проводника с током вокруг магнита (и наоборот), что явилось прообразом электродвигателя. Им же было показано, что механическое движение проводника в магнитном поле вызывает появление электродвижущей силы (принцип электромагнитического генератора): в 1831 г. он открыл явление электромагнитной индукции. В 1836 г. Фарадей сформулировал два закона электролиза, которыми установил связи между количеством электричества и химическими свойствами веществ.

Великий английский физик совершенно определенно подчеркивал необходимость установления эквивалентов между различными видами энергии или, по терминологии того времени, между различными силами. Он писал [21]: «Мы имеем много процессов, при которых внешняя форма силы может претерпевать такие изменения, что происходит явное превращение ее в другую. Так, мы можем превратить химическую силу в электрический ток, а электрический ток в химическую силу. Прекрасные опыты Зеебека и Пельтье показывают взаимную связь теплоты и электричества, а Эрстеда и мои собственные показывают превращаемость электричества и магнетизма. Но ни в одном случае, даже с электрическим углем и скатом, нет производства силы без соответствующего израсходования чего-либо, что питает ее». В своем дневнике в 1837 г. Фарадей записал: «Нужно сравнить количество материальных сил (т. е. сил электричества, тяготения, химического сродства, сцепления и т. д.), где возможно дать выражение для их эквивалентов в той или иной форме».

Следует упомянуть и третью важную предпосылку к открытию закона сохранения и превращения энергии — успехи биологии. Среди энциклопедических исследований М. В. Ломоносова можно найти догадку о том, что растения питаются одной из составных частей воздуха. Через 30 лет, в 1783 г., этот факт научно обосновал швейцарский ботаник Сенебье. Постепенно формировались представления о переработке в растениях неорганических элементов в органические. Развенчался миф об особой «жизненной силе» в организмах человека и животных. Была установлена прямая связь между количеством потребляемой пищи и способностью производить работу.

Наступило время широких обобщений — 40-е годы прошлого столетия. Самое главное, что предстояло сделать, — это осмыслить тот факт, что, кроме вещества, которое, изменяясь качественно, сохраняет свое количество, в природе существует еще нечто иное, связанное с движением материальных частиц и тел, что тоже подчиняется своему закону сохранения и меняет свою форму.

Решающую роль в установлении закона сохранения и превращения энергии история отводит Роберту Майеру, Джеймсу Джоулю и Герману Гельмгольцу.

Роберт Майер был судовым врачом на голландском корабле, когда в 1840 г. «внезапно» ему пришла в голову мысль о законе сохранения и превращения энергии. Слово «внезапно» мы взяли в кавычки; о внезапном озарении писал впоследствии сам Майер, но может ли быть «внезапным» открытие, предпосылки которого были хорошо известны выпускнику Тюбингенского университета? Внезапным был для Майера исходный толчок: он обратил внимание на то, что было хорошо известно врачам, работающим постоянно в тропических широтах. Оказывается, венозная кровь у заболевших во время стоянки корабля на Яве матросов была не столь темной, как в умеренных широтах. Майер понял, что при высокой средней температуре воздуха для поддержания жизнедеятельности и необходимой температуры организма требуется меньше питательных веществ и меньшее «сгорание» последних. Сопоставление многочисленных научных фактов

из области химии, физики и биологии привело его к тому, что мысли, согласно выражению Майера, пронзившие его, подобно молнии, навели на вывод о существовании всеобщего закона природы.

В 1841 г., вернувшись на родину, в Гейльбронн, Майер написал статью «О количественном и качественном определении сил» и направил ее редактору известного тогда журнала «*Annalen der Physik*». Редактор не счит нужным ее напечатать и даже не ответил автору. Рукопись статьи была обнаружена в архивах редакции и опубликована лишь в 1881 г., т. е. 40 лет спустя. Следующая статья «Замечания о силах неживой природы» была опубликована в 1842 г. В этой работе Майер много внимания уделяет взаимопревращениям механической работы и теплоты, не зная о соответствующем исследовании Карно, определяет механический эквивалент теплоты (по его данным он равен 365 кгм/ккал), говорит о «неразрушимости» сил и формулирует свой принцип. Здесь же Майер впервые в истории науки вкладывает в понятие «сила» смысл «энергия», не прозвучавшее еще этого слова (впрочем, слово было произнесено раньше; этим словом английский физик Томас Юнг обозначал величину, пропорциональную массе и квадрату скорости движущегося тела).

Идеи Майера носили столь общий и универсальный характер, что они сначала не были восприняты современниками. Его жизнь превратилась в непрерывную борьбу за утверждение своего принципа. Противники выискивали в работах Майера малейшие неточности и неудачные формулировки, подвергали сомнению все его научные результаты в целом.

Классические измерения механического эквивалента теплоты провел в 1841—1843 гг. (опубликовано в 1843 г.) английский физик, в прошлом манчестерский пивовар, Джемс Джоуль. По его данным, этот эквивалент составлял 460 кгм/ккал. Джоуль также установил независимо от Ленца связь между электрическим током и выделяемым теплом (закон Джоуля — Ленца). Интересно отметить, что и работу Джоуля Британское королевское общество отказалось опубликовать в полном объеме, требуя от него все новых и новых экспериментальных уточнений.

Наконец, немецкий естествоиспытатель Герман Гельмгольц в 1847 г. в работе «О сохранении силы» дал в наиболее общем смысле закон сохранения, показав, что сумма потенциальной и кинетической энергии остается постоянной. Большое значение имело приведенное в этой же работе доказательство того, что процессы в живых организмах тоже подчиняются закону сохранения энергии. Здесь же впервые дана математическая трактовка закона.

Завершением длительного пути, пройденного наукой до точной формулировки закона сохранения энергии, можно считать доклад Уильяма Томсона (впоследствии лорда Кельвина) «О динамической теории тепла» (1851 г.). Томсон в 1860 г. ввел в науку термин «энергия» в современном его смысле.

Изложение истории открытия закона уместно закончить словами выдающегося английского физика и общественного деятеля Джона Бернала, написанными 100 лет спустя, в 1954 г.: «Закон сохранения энергии... был величайшим физическим открытием XIX в. Он объединил много наук и находился в исключительной гармонии с тенденциями времени. Энергия стала универсальной валютой физики — так сказать, золотым стандартом изменений, происходивших во вселенной. То, что было установлено, представляло собой твердый валютный курс для обмена между валютами различных видов энергии: между калориями, теплотой, килограммометрами работы и киловаттчасами электричества. Вся человеческая деятельность в целом — промышленность, транспорт, освещение и, в конечном счете, питание и сама жизнь — рассматривалась с точки зрения зависимости от этого одного общего термина — энергии».

Этим законом было дано научное подтверждение материалистической идеи о неумножимости движения. Только опираясь на диалектический материализм, можно было раскрыть всю глубину содержания закона сохранения энергии. Эта задача была выполнена Энгельсом, который впервые дал всесторонний марксистский анализ закона сохранения и превращения энергии, показав, что главное, положительное в этом законе — качественное превращение форм движения материи. Энгельсу принадлежат раскрытие содержания понятия энергии как меры движения материи. Само название — «закон сохранения и превращения энергии» — было введено в научное обращение Энгельсом.

НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД РАЗВИТИЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ

**ПРЕДПОСЫЛКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ.
ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Наиболее характерными энергоемкими производственными процессами, с которыми впервые столкнулся человек, являлись: подъем воды для орошения полей и размол зерна. Рассмотрим в качестве примера зерновую мельницу. Вращение жернова требовало от работника длительной, однообразной, изнуряющей механической работы. Но, с другой стороны, именно в этой монотонной, непрерывно повторяющейся операции, не требовавшей ни мышления, ни производственного мастерства, где человек выполнял только функцию двигателя, заключалась возможность перехода к применению энергии прирученного животного или неорганической природы и в первую очередь — энергии воды. Так возникла гидроэнергетика, приведшая к замене человека-двигателя механическим двигателем.

Время применения гидравлических двигателей, насчитывающее более чем двухтысячелетнюю историю, может быть разделено на несколько периодов.

Первый период — самый длинный — продолжается от постройки первых водяных колес до середины 30-х годов XIX в. Он характеризуется применением гидравлических силовых установок, в которых использовались водяные колеса разных конструкций. Механическая энергия водяных колес или использовалась на месте ее получения, или передавалась при помощи механических устройств на небольшие расстояния (обычно не более нескольких десятков метров).

Второй период продолжался от середины 30-х до начала 90-х годов прошлого века. В это время был осуществлен переход к водяной турбине, изучены происходящие в ней процессы, усовершенствована ее конструкция. Водяное колесо потеряло значение основного двигателя и сохранялось лишь в маломощных установках. Механическая энергия водяных турбин также использовалась на месте ее производства или в непосредственной близости к нему; в этом отношении практика водяных турбин еще не дала энергетике чего-либо принципиально нового по сравнению с тем, что она получила от водяных колес.

Решение проблемы передачи электрической энергии на расстояние положило начало новому этапу в истории использования гид-

равлической энергии, когда стали строиться водяные турбины для применения в гидросиловых установках. При этом осуществлялось превращение механической энергии на месте ее получения в энергию электрическую, передаваемую к месту ее потребления на различные расстояния.

Гидравлические машины, превращающие механическую энергию движения воды в энергию движения вращающегося вала, можно разделить на две основные группы: первичные гидравлические двигатели и устройства для передачи и распределения энергии с помощью промежуточной жидкой среды. К первой группе относятся водяные колеса и гидравлические турбины, создающие непрерывное вращательное движение рабочего вала, водостолбовые машины, гидравлические тараны, а также двигатели, использующие энергию приливов. Ко второй группе относятся гидравлические прессы, гидроприводы и различные виды гидропередач, которые получили значительное распространение в современном машиностроении и аппаратостроении.

РАЗВИТИЕ ВОДЯНЫХ КОЛЕС

Первые гидравлические установки отражали ранние формы взаимоотношения человека с окружающей его природой: присвоение готовой энергии природы (без воздействия на нее).

Ранние водяные двигатели очень просто сочленились с водо-подъемными установками: водяное колесо, установленное на сваях, вбитых в дно реки, приводилось в движение потоком воды; на ободе колеса размещались черпаки, поднимающие и выливающие воду в отводной желоб. Таким образом, объединялись транспортная и энергетическая машины. Свободно стоящие («плавающие») водяные колеса использовали только скоростную составляющую энергии воды.

Более сложным было применение водяного колеса для зерновых мельниц, у которых между жерновом и водяным колесом сооружался передаточный механизм, обеспечивающий вращение водяного колеса вокруг горизонтальной, а жернова — вертикальной оси.

Стремление обойтись без сложной механической передачи между валами, расположенными под прямым углом, привело к созданию (для привода мельничных поставов) водяных колес с вертикальным валом. Чтобы струя воды, направляемая на лопатку такого колеса, не отклонялась силой тяжести, струе пришлось придать значительную скорость. Струя, падая на плоскую лопатку с большой скоростью, вызывала сильное разбрызгивание; во избежание этого лопатки стали делать изогнутыми. Так возник прототип современных активных гидравлических турбин (рис. 3.1).

Увеличение числа гидросиловых установок, накопленный опыт, а главное — недостаток в реках с большой скоростью течения потребовали перехода к более целесообразному использованию вод-

ных энергетических ресурсов. Началось сооружение плотин и деривационных каналов*, позволившее использовать медленно текущие равнинные реки и создавать условия для более эффективной утилизации гидроресурсов. При сооружении плотин можно было использовать не только скорость потока, но и энергию положения, конструируя средненаливные и верхненаливные (рис. 3.2) водяные

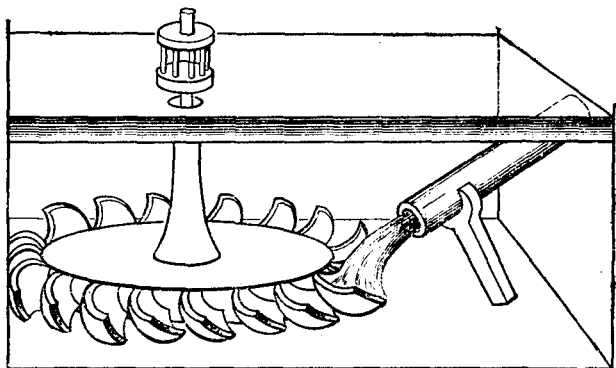


Рис. 3.1. Водяное колесо с вертикальным валом и ковшеобразными лопатками

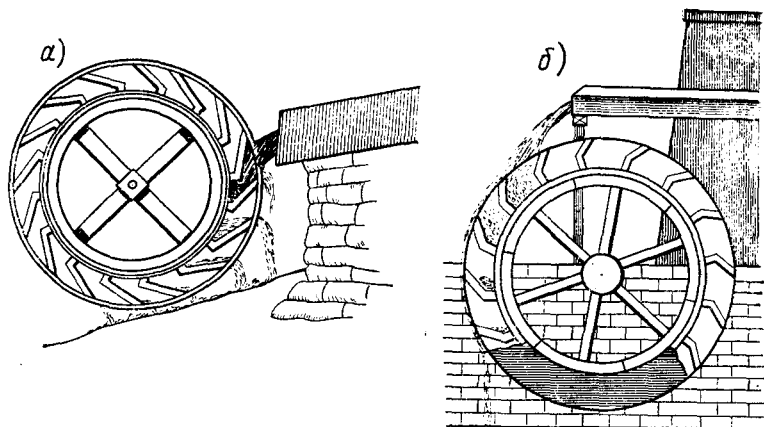


Рис. 3.2. Средненаливное (а) и верхненаливное (б) водяные колеса

колеса. Верхненаливные колеса были в то время наиболее эффективными, их к. п. д. достигал 75%. Именно в этой форме гидравлический двигатель стал использоваться в быстро развивавшейся энергетике феодального общества.

* Деривация в гидротехнике — совокупность сооружений, осуществляющих отвод воды из реки или водохранилища и транспортировку ее к водяному колесу или турбине.

На территориях, не располагавших гидравлическими энергоресурсами, сооружались ветровые двигатели, преимущественно для привода мельничных жерновов. Однако крайняя неравномерность и низкая концентрация природной «готовой» ветровой энергии, а также трудности эффективного аккумулирования механической энергии не позволили энергии ветра занять заметное место в общем энергетическом балансе.

В сооружении водяных колес был достигнут значительный успех. Немецкий ученый Г. Агрикола (XVI в.) дал описание реверсивного водяного колеса (рис. 3.3), применявшегося для подъема руды из рудника. Колесо имело две системы лопастей. При подаче воды на лопасти одной системы колесо вращалось в одном направлении, с переключением подачи направление вращения

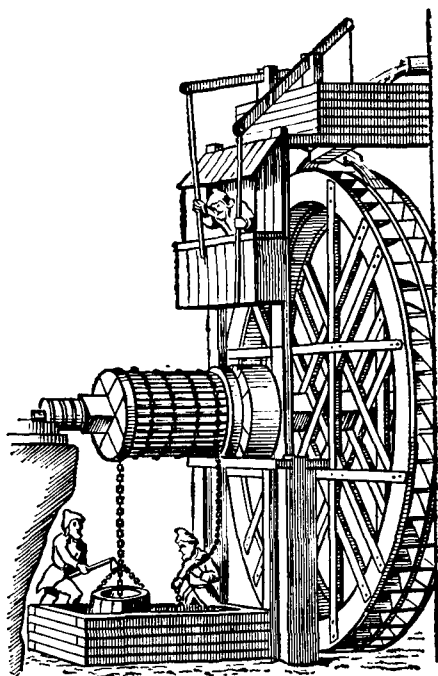


Рис. 3.3. Подъемная машина с реверсивным водяным колесом (из книги Агриколы)

менялось. В 1582 г. была пущена лондонская водоподъемная установка (на р. Темзе), состоявшая из пяти подливных (нижнебойных) водяных колес диаметром 6—7 м, приводивших в движение ряд насосов и перекачивающих в сутки 18 000 м³ воды. В 1685 г. во Франции на реке Сене была сооружена водоподъемная установка для питания водой фонтанов парка Версальского дворца, состоявшая из 14 подливных колес диаметром 12 м, приводивших в действие 235 поршневых насосов, которые поднимали 3000 м³ воды в сутки на высоту 162 м.

В середине XVIII в. на Алтае К. Д. Фролов соорудил уникальную гидросиловую установку для привода подъемных и транспортных устройств двух рудников. Установка представляла собой каскад с последовательно расположенными колесами, наибольшее из которых имело диаметр 17 м (рис. 3.4). Эта установка явилась высшим достижением гидроэнергетики своего времени.

Исследования ученых показали, что изогнутые лопатки более эффективны, чем плоские, так как они дают возможность осуществить безударный вход воды, что повышало к. п. д.; металлические водяные колеса с изогнутыми лопатками получили широкое применение.

Ж. В. Понселе предложил особый род подливных колес, в которых благодаря специальной форме лопаток можно было получить высокий к. п. д. (до 70%), недостижимый в других подливных колесах. Лопаткам в колесе Понселе придавалась такая форма, что подводимая вода поступала в направлении их кривизны, проходила вверх по лопатке и затем, опускаясь, выходила наружу. При таких условиях совершенно устранялись удары воды о лопатки при

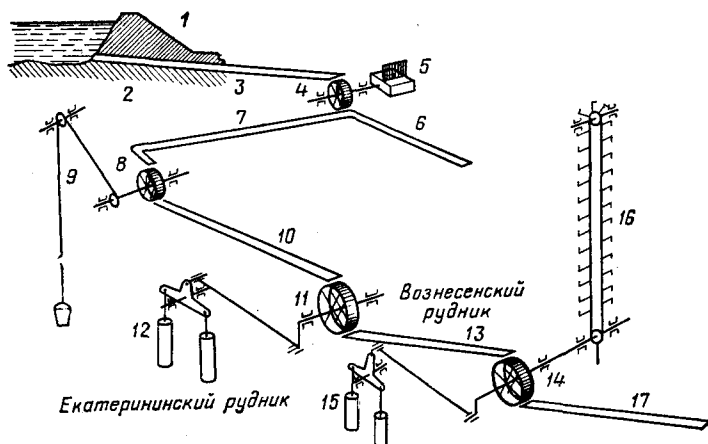


Рис. 3.4. Схема гидроэнергетической установки К. Д. Фролова: 1 — плотина длиной 128 м и высотой 17,5 м; 2 — штольня длиной 443 м; 3 — канал длиной 96 м; 4 — водяное колесо диаметром 4,3 м; 5 — лесопилка; 6 — отвод воды к Преображенскому руднику; 7 — подземный канал длиной 128 м; 8 — водяное колесо диаметром 4,3 м; 9 — рудоподъемник на высоту до 102 м; 10 — подземный канал длиной 64 м; 11 — водяное колесо диаметром 17 м; 12 — насосы Екатеринбургского рудника; 13 — подземный канал длиной 320 м; 14 — водяное колесо диаметром 15 м; 15 — насосы Вознесенского рудника; 16 — рудоподъемник Вознесенского рудника; 17 — отвод в р. Корбалиху; весь путь воды 2300 м

входе и сопутствующие потери энергии. Водяные колеса имели особые щитки, направляющие воду к лопаткам — прообраз направляющего аппарата. Наиболее распространенными типами водяных колес, изготовлявшихся заводами в XIX в., были такие, которые предназначались для применения при малых напорах (не более 1,5 м). Все колеса такого рода имели малое число оборотов (а потому были большого диаметра), обод значительной ширины и большое число лопаток.

Водяное колесо являлось основной энергетической базой производства в течение примерно 14 веков (с IV по XVIII в.). Во второй половине XIX в. гидроэнергетика утратила ведущее значение, уступив его теплоэнергетике. Новый подъем гидроэнергетики и переход ее на новую качественную ступень наметился в самом конце XIX в. в связи с решением проблемы передачи энергии на большие расстояния электрическим током.

Ограниченность энергетического потенциала водяного колеса прежде всего сказалась в металлургии и рудном деле. Для получения железа люди добывали руду, дробили ее в ступах, плавили в «домницах», нагнетая в них воздух, а полученное железо проковывали под молотами. Двигателем, приводившим в движение песты дробильных ступок, мехи «домниц», молоты кузниц, был сам человек. Но так как для привода в движение перечисленных производственных агрегатов не требовалось специальных знаний и навыков, человек мог заменить себя более мощным двигателем — водяным колесом. Это позволило увеличить размеры агрегата, которые ранее определялись мощностью человека-двигателя, а следовательно, увеличить и производство железа. Так, «домница» выросла в домну, ручной молот — в громадный молот, поднимаемый энергией потока воды, и т. п.

Теперь границы роста размеров пестов, домен, молотов определялись только мощностью водных потоков. Но в горнорудном деле и металлургии, кроме энергии, необходимыми элементами производства являлись руда и горючее (дрова). Природа редко сосредоточивает в одном географическом пункте ресурсы руды, топлива и водной энергии. Поскольку водная энергия нетранспортабельна, доставка руды и топлива к месту источника водной энергии становилась элементом производства, в значительной степени определявшим себестоимость продукции. Так, энергетика водяного колеса начинала приходить в конфликт с вызванными ею же новыми производственными возможностями.

Наиболее остро кризис водяного колеса сказался в горнорудном производстве. Действительно, если отсутствие в одном пункте руды и леса означало лишь удорожание продукции или экономическую нецелесообразность производства металла, то отсутствие там же источника энергии делало невозможным его производство. Истощив запасы поверхностных болотных руд, человек вынужден был все глубже проникать в недра земли. Вместе с углублением рудников росло потребление энергии на откачивание воды из них. И все труднее было найти счастливое совпадение в одном географическом пункте рудного месторождения и достаточно мощного водяного потока.

Главная ограниченность энергетики водяного колеса, о которой писал К. Маркс, заключалась в том, что она «имела чисто локальный характер» и поэтому не могла обеспечить энергией предприятия, удаленные от водных источников.

Так возникла потребность в новой энергетике, особенно остро проявившаяся в рудничном водоподъеме. Но и водяное колесо, потеряв в XVIII в. свое значение как основа энергетики, сравнительно медленно уступало свои позиции. Так, например, к 1917 г. в России было установлено 46 000 водяных колес; их суммарная мощность достигала 40% всей установленной в стране мощности (за исключением транспорта). В экономически отсталых странах и сейчас еще работает большое число водяных колес.

РАЗВИТИЕ ВОДЯНЫХ ТУРБИН

Водяное колесо могло работать только при малых напорах, которыми обладали равнинные реки. Между тем громадные запасы гидравлической энергии были заключены в водных потоках со средними (8—25 м) и высокими (более 25 м) напорами. В этих условиях водяное колесо вообще не могло быть установлено. Единственная возможность для освоения громадной энергии таких водных потоков заключалась в создании гидравлического двигателя, принципиально отличного от водяного колеса.

Водяные колеса приводились во вращение действием веса воды или ударом струи в лопасти. Но можно было использовать и другое физическое явление — силу реакции потока воды на лопастях рабочего колеса.

Толчком к развитию новых идей в области гидравлических двигателей явились труды Бернулли. В работе «Гидродинамика», опубликованной в 1738 г., Бернулли обобщил ряд своих исследований по вопросам гидравлики и гидродинамики и вывел уравнение, устанавливающее связь между давлением и скоростью в каждой точке потока несжимаемой каплевой жидкости:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{const},$$

где v — скорость движения жидкости; g — ускорение силы тяжести; p — давление в рассматриваемой точке потока; γ — удельный вес жидкости.

В этом уравнении $v^2/2g$ — удельная кинетическая энергия, т. е. энергия, отнесенная к единице веса, а $z + p/\gamma$ — удельная потенциальная энергия, складывающаяся из p/γ — удельной энергии давления и z — удельной энергии положения. Этим законом устанавливается постоянство энергии каждой частицы жидкости в потоке.

Уравнение Бернулли не только отражало закон сохранения и превращения энергии для частного случая гидравлической энергии, но и отчетливо указывало на принципиальную возможность построения гидравлических двигателей двух разных классов: использующих либо кинетическую ($v^2/2g$), либо потенциальную ($z + p/\gamma$) составляющую полной энергии водного потока. Кроме того, Бернулли разработал теорию реактивного действия, возникающего при вытекании струи через отверстие, сделанное в стенке сосуда.

Практически сила реакции, создаваемая потоком воды на лопасти рабочего колеса, впервые была использована в 1745 г. английским механиком Баркером, построившим реактивное колесо, а в 1747—1750 гг. — венгерским физиком Я. А. Сегнером. Сегнер, работавший в Геттингенском университете, создал прибор, названный сегнеровым колесом, который и явился прототипом реактивного гидравлического двигателя. В последующем Сегнер усовершенствовал конструкцию. Первоначально он построил цилиндр с двумя трубками для выпуска воды, а затем — с четырьмя (рис. 3.5) и даже шестью. Последнюю из этих конструкций Сегнер пытался применить для вращения жернова, т. е. превратить этот прибор в двигатель, пригодный для энергоемкой работы. Однако недостаточное понимание сущности физических процессов, происходящих в таком двигателе, не позволило Сегнеру рационально его усовершенство-

вать. Единичные экземпляры сегнеровых колес, простых и сдвоенных, применялись до середины XIX в.

Тем не менее, и в несовершенном реактивном двигателе Сегнера Л. Эйлер усмотрел большие практические возможности. Уже в первом докладе, сделанном в Берлинской академии наук (1750 г.), Эйлер дал анализ процессов в сегнеровом колесе и указал, что низкий к. п. д. получается вследствие потерь энергии при входе и выходе воды из колеса. Эйлер показал, что, усовершенствовав сегнеро-

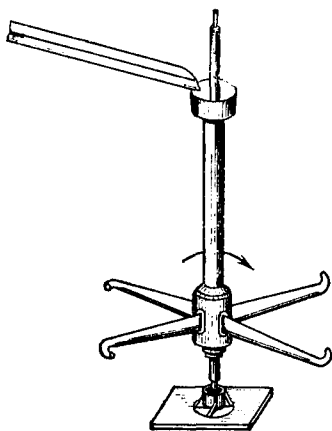


Рис. 3.5. Модель сегнерова колеса с четырьмя водоотводными трубками

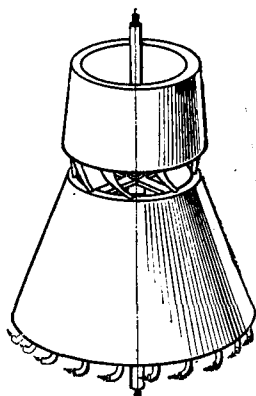


Рис. 3.6. Гидравлическая турбина Эйлера

во колесо (в основном за счет более рационального подвода и отвода воды), можно использовать почти всю энергию воды, пропускаемой через колесо.

В последующих докладах ученого (1751—1754 гг.) были показаны преимущества сегнерова колеса перед другими гидравлическими машинами и изложена теория водяного реактивного двигателя. На основе уравнений сохранения количества движения он вывел уравнение работы гидравлической турбины, которое нашло применение также и в теории лопастных насосов, турбокомпрессоров и вентиляторов. Идея Эйлера о рациональной конструкции гидравлической турбины получила свое окончательное выражение в его предложении разделить гидравлическую машину нового типа на две части — неподвижную и вращающуюся. Через неподвижный направляющий аппарат вода поступает в нижнее вращающееся колесо, насаженное на вал и являющееся рабочим органом машины; рабочее колесо имело 20 коротких изогнутых труб для выхода воды. В таком виде гидравлический двигатель представлял собой переходную конструкцию от первоначальной формы сегнерова колеса к гидравлической турбине (рис. 3.6).

Несмотря на полную научную и техническую обоснованность конструкции водяной турбины, предложенной Эйлером, она в

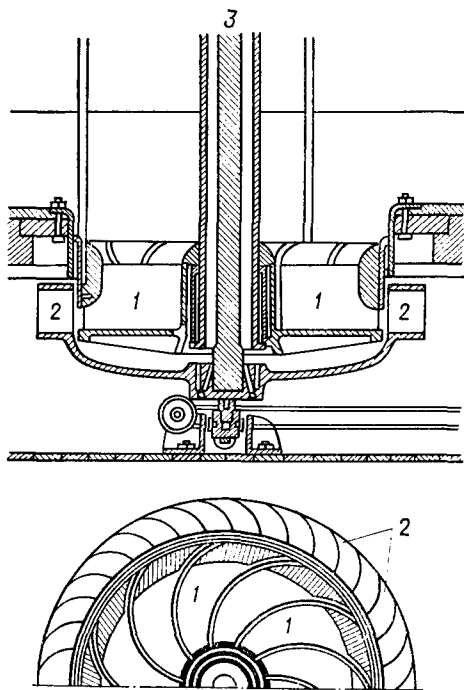


Рис. 3.7. Гидравлическая турбина Фурнейрона:

1 — направляющий аппарат; 2 — рабочее колесо; 3 — вал турбины

XVIII в. по экономическим причинам не вошла в практику и, возможно, даже не была опробована на практике. Лишь в 40-х годах XX в. в Швейцарии, на родине Эйлера, была построена действующая модель турбины с некоторыми конструктивными дополнениями, которые устраняли разбрызгивание воды при выходе из направляющего аппарата. Испытания показали, что эта турбина имеет наибольший к. п. д. (71,2%) при числе оборотов $n = 180$ об/мин. Оба эти показателя говорят о высоких качествах двигателя. Так, скорость вращения турбины Эйлера в десятки раз превосходила скорость колес, применявшихся в XVIII в.

После промышленного переворота появились разнообразные рабочие машины, скорость вращения которых превышала 100 об/мин, в то время как водяные колеса

делали лишь $4 \div 8$. Поэтому естественным было стремление использовать более быстроходные гидравлические двигатели в тех случаях, когда применение парового двигателя оказывалось невозможным.

Гидравлические турбины начали разрабатываться и внедряться в машинное производство во Франции. «Общество для поощрения национальной промышленности», организованное в 1789 г., объявляло публичные конкурсы на разработку наиболее важных для промышленности технических вопросов. Так, в 1824 г. был объявлен открытый конкурс на построение гидравлического двигателя.

Одним из первых проектов, получивших поощрительную премию, был двигатель проф. К. Бюрдена, представившего еще в 1822 г. в Парижскую академию наук доклад о новом гидравлическом двигателе, который им был назван гидравлической турбиной*. Опытный экземпляр этого двигателя был установлен на мукомоль-

* Слово турбина происходит от латинского слова *turbo*, что означает круговое движение или быстрое вращение.

ной мельнице. Результаты испытания оказались мало утешительными, так как турбина имела конструктивные недостатки, но автор, применив направляющий аппарат, устранявший удар воды о лопасти турбины, сделал заметный шаг вперед в области создания гидравлического двигателя нового типа. На вторично объявленный конкурс (1827—1832 гг.) была представлена турбина Б. Фурнейрона, которая представляла собой реактивный гидравлический двигатель радиального типа с движением воды через направляющий аппарат от центра к периферии (рис. 3.7); об-

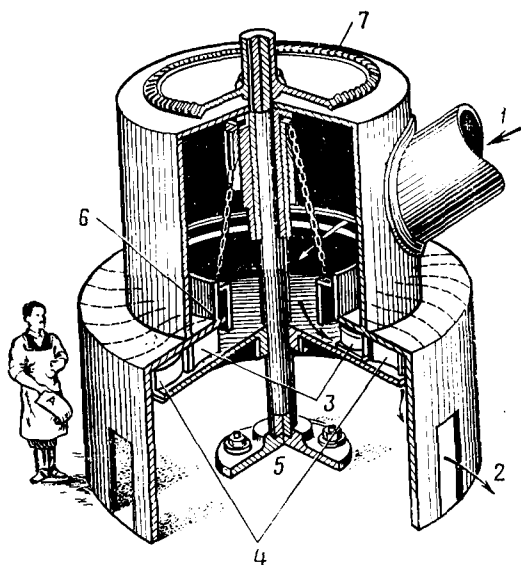


Рис. 3.8. Гидравлическая турбина Сафонова:
1 — подвод воды; 2 — отвод воды; 3 — лопасти направляющего аппарата; 4 — рабочие лопасти; 5 — подпятник вала; 6 — кольцевая заслонка, регулирующая количество поступающей воды; 7 — коническая шестерня для передачи энергии машине-орудию

разец имел мощность $50 \div 70$ л. с., скорость вращения более 60 об/мин, к. п. д. $70 \div 80\%$. В начале 1836 г. турбину Фурнейрона установили на текстильной фабрике, имевшей 450 станков.

В России, богатой реками и располагавшей большим числом предприятий, расположенных вблизи рек, проблема усовершенствования гидравлического двигателя была особенно актуальной. Не случайным поэтому является то обстоятельство, что уже в 1837 г. на Алапаевском металлургическом заводе была построена плотинным мастером И. Е. Сафоновым первая водяная турбина такого же типа, как турбина Фурнейрона. Через несколько лет такого рода водяные турбины были построены на Ирбитском и Нейво-Шайтанском заводах на Урале. На рис. 3.8 показана водяная турбина, установленная на Нейво-Шайтанском заводе. Она имела мощность около 60 л. с. при напоре 3,45 м, к. п. д. ее был около 70% . Для регулирования расхода воды в турбине был устроен особый подъемный щит.

Сафонов и Фурнейрон создавали реактивные турбины приблизительно в одни и те же годы, но Сафонов работал совершенно самостоятельно, решая многие вопросы на основе собственного опыта, что нашло свое отражение в конструкциях его турбин.

Успех первых турбин Фурнейрона, разработка Понселе теоретических основ расчета гидравлических турбин, а также возросшие требования промышленности к скорости вращения и экономич-

ности водяного двигателя привели к тому, что начиная с 40-х годов XIX в. гидротурбостроение интенсивно развивалось, все более вытесняя водяное колесо.

Существенное отличие турбин от водяного колеса заключается в том, что в турбине вода входит на одну кромку лопатки, проходит по лопатке и выходит с другой кромки, не меняя направления своего движения. В водяном же колесе вода входит и выходит в одном и том же месте, совершая перемещение на лопатке в обратную сторону; вследствие этого как скорость, так и направление движения воды в некоторой точке лопатки различны в разные моменты времени. В турбине вода от входных до выходных кромок течет непрерывно, и в каждой точке лопатки скорость ее одинакова по направлению и отличается только по величине. Так как вода имеет возможность поступать в рабочее колесо теоретически с любой скоростью, то турбина может, во-первых, применяться в широком диапазоне напоров и, во-вторых, развивать большее число оборотов. Кроме того, в турбине вода проходит одновременно по всем лопаткам рабочего колеса, а в водяном колесе — лишь по небольшой их части, что приводит к уменьшению размеров турбины по сравнению с водяным колесом. Меньшие размеры и вес турбины при большей скорости позволяют сделать всю конструкцию более компактной и упрощают передаточные механизмы.

Хотя в течение XIX в. было построено довольно много водяных турбин разных конструкций, их можно классифицировать по отдельным признакам. Прежде всего водяные турбины делятся на два основных класса: реактивные и активные.

В реактивных турбинах вода заполняет все каналы между лопатками направляющего аппарата и рабочего колеса. Это так называемые полные или напорные турбины.

Реактивные турбины способны работать при большем расходе воды. Так как мощность гидравлической турбины пропорциональна напору и расходу воды, то реактивные турбины могут развивать значительную мощность при малых напорах за счет больших расходов и поэтому удобны для использования на равнинных реках.

В активных турбинах вода проходит через турбину свободно, не заполняя всего рабочего колеса или действуя на часть его, причем давление среды, окружающей воду в турбине, всюду одинаково. В турбинах этого рода передача энергии, приносимой потоком воды в рабочее колесо, осуществляется в основном за счет изменения кинетической энергии воды. Эти турбины получили также название свободноструйных, они пригодны в условиях переменного и, в частности, малого количества воды, но при больших напорах. Активные турбины могут действовать при одновременной работе не всех, а только части рабочих лопаток. Такие турбины носят название парциальных; в этом случае направляющий аппарат может строиться в виде неполного колеса или отдельных трубчатых сопел (насадок) с приспособлениями для регулирования пропуска воды.

Водяные турбины могут быть либо с горизонтальным валом, на который насажено рабочее колесо, либо с валом вертикальным. В соответствии с этим различают турбины горизонтальные и вертикальные.

Наиболее естественным представляется размещение направляющего аппарата турбины над рабочим колесом. В таких турбинах движение воды будет происходить по цилиндрическим поверхностям, ось которых параллельна оси рабочего колеса; подвод воды также происходит в направлении, параллельном этой оси. Такие турбины получили название осевых или аксиальных реактивных турбин. Но, как указывалось выше, первая турбина Фурнейрона имела подвод воды к рабочему колесу из направляющего аппарата в радиальном направлении, причем рабочее колесо охватывало направляющий аппарат. Такого типа турбины носят название радиальных (или, как их иногда называли, центробежных, так как направление воды в турбине соответствует направлению центробежной силы); более правильное их наименование — турбины с внутренним радиальным подводом воды.

Более практичным оказался тип турбин с наружным радиальным подводом воды, так как при этом размеры вращающегося рабочего колеса получаются меньшими, удобней применять отсасывающую трубу, можно видоизменять кон-

струкцию рабочего колеса применительно к разным числам оборотов.

Значительное распространение получили реактивные турбины, в лопатках рабочего колеса которых вода претерпевает изменение радиального направления на осевое. Такие турбины называются радиально-осевыми; в них рабочее колесо турбины удобно сочетается с горизонтально расположенным направляющим аппаратом и вертикальной отсасывающей трубой.

Вскоре после радиальной реактивной турбины Фурнейрона был предложен ряд других реактивных турбин, среди которых наибольшее распространение получили турбины К. А. Геншеля (Германия, 1837 г.) и Жонваля (Франция, 1843 г.). Обе эти турбины осевого типа; они сходны по конструкции и вошли в практику под наименованием турбин Геншеля — Жонваля (рис. 3.9). Такие турбины строились как горизонтальными, так и вертикальными. В них лопатки направляющего и рабочего колес имели форму винтообразно искривленных поверхностей, причем направление кривизны лопаток направляющего колеса противоположно направлению кривизны лопаток рабочего колеса. Турбины Геншеля — Жонваля стали строиться с новым рабочим органом — отсасывающей (всасывающей) трубой, позволявшей использовать весь перепад и повышавшей к. п. д. Турбина Геншеля — Жонваля быстро вытеснила турбины Фурнейрона и строилась разными заводами в течение всего XIX в. Наиболее распространены были турбины вертикального типа, наряду с одновенечными строились двух- и трехвенечные турбины. Сконструированы были также сдвоенные турбины этого же типа. После того как стала возможна передача электроэнергии на расстояние, были построены быстроходные турбины Геншеля — Жонваля, непосредственно соединяющиеся с электрическим генератором. В усовершенствовании этих турбин значительную роль сыграли русские машиностроители И. А. Тиме, В. И. Рожков, А. И. Пермяков и др.

В 1851 г. французским инженером Жираром была предложена конструкция активной осевой турбины. Наибольшее распространение во второй половине XIX в. получили радиально-осевые реактивные турбины. Американский конструктор Хауд в 1838 г. получил патент на радиальную турбину с внешним подводом воды (с центробежным движением). Эта турбина была настолько изучена и улучшена в 1849 г. американским инженером Д. Б. Френси-

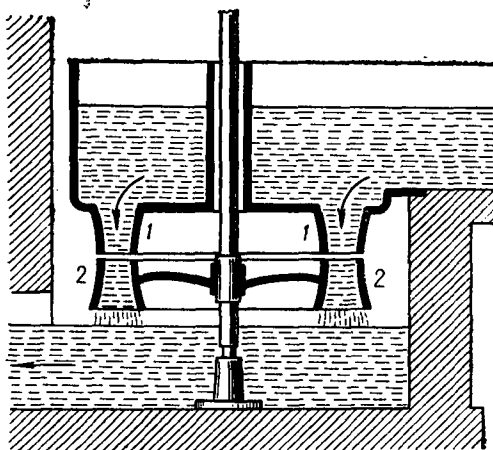


Рис. 3.9. Осовая турбина Геншеля — Жонваля:

1 — направляющее колесо; 2 — рабочее колесо

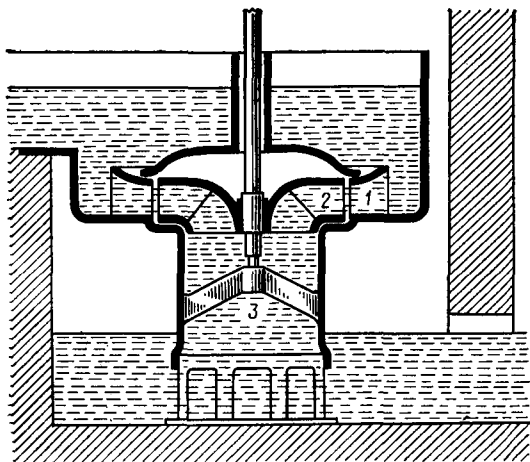


Рис. 3.10. Радиально-осевая турбина (с наружным подводом воды):

1 — направляющий аппарат; 2 — рабочее колесо; 3 — подпятник вала

сом, что стала называться турбиной Френсиса (рис. 3.10). В 1885 г. американский инженер Свейт придал этой турбине радиально-осевой характер.

После разработки радиально-осевой турбины оказалось возможным усовершенствовать гидравлическую турбину, используя:

а) поворотные лопатки в направляющем колесе; таким образом, направляющему аппарату придавались функции регулирующего органа; с радиально-осевыми турбинами с поворотными лопатками не могли конкурировать многие другие типы турбин (например, турбины Геншеля — Жонваля);

б) отсасывающую трубу, позволявшую отвести от рабочего колеса воду с наименьшими потерями;

в) спиральную камеру для подвода воды к направляющему аппарату, обеспечивающую равномерный подвод воды ко всем точкам по окружности колеса с одинаковой скоростью и направлением. Все это повышало к. п. д. турбины.

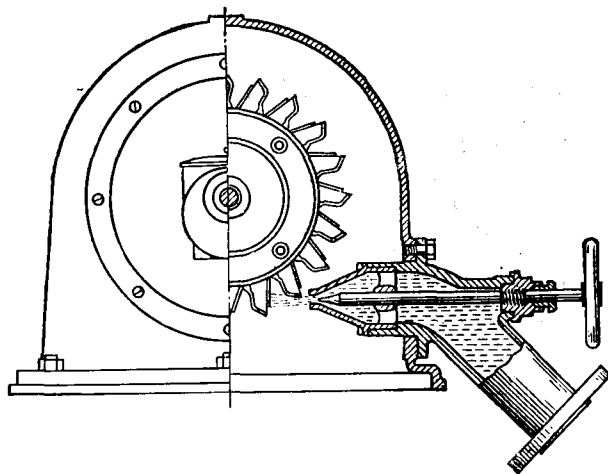


Рис. 3.11. Активная турбина Пельтона

Для использования энергии воды при больших напорах были разработаны конструкции активных турбин. Наибольшее распространение в конце XIX в. получила активная турбина А. Пельтона, отличавшаяся простотой конструкции и удобством применения. Турбина (рис. 3.11) не имела каналов. Струя воды воздействовала на ковшеобразные лопатки, укрепленные на рабочем колесе (поэтому турбину нередко называют ковшовой). Мощность струи регулировалась сначала язычковым затвором, а затем особым шпинделем, входящим в сопло («иглой»). Ковш с безударным входом струи, предложенный Пельтоном, стал основой конструкции современных ковшовых турбин.

РАЗВИТИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

ПРЕДПОСЫЛКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

В любом двигателе нужно различать степень его зависимости от локальных (местных) условий и степень его возможной применимости для разнообразных нужд промышленности, определяемой Марксом как универсальность по техническому применению*. Двигатель, мало зависящий от локальных условий (определяется энергоемкостью источника энергии) и универсальный по своему техническому применению (определяется конструктивными формами двигателя), является универсальным. Очевидно, что водяное колесо, будучи связано с определенным местом, не может быть универсальным двигателем промышленности и транспорта, хотя оно является универсальным по своему техническому применению, поскольку отдает потребителю работу в наиболее удобной форме непрерывного и равномерного вращательного движения.

Решение первой части задачи во многом определило поиски источника энергии. Вопрос об универсальности двигателя по техническому применению еще не ставился.

Практика эксплуатации водоподъемных установок показала, что всасыванием поднять воду выше определенной высоты нельзя. Этот вывод, почерпнутый из наблюдений, нанес серьезный удар лженаучному утверждению схоластов, будто бы «природа боится пустоты». Это утверждение было окончательно опровергнуто в 1643 г. итальянским ученым Э. Торричелли, установившим величину атмосферного давления. Эффектные опыты Отто фон Герике, проведенные в Магдебурге в 1672 г., когда восьмерка лошадей оказалась не в состоянии разъединить медные полушария, образовавшие шар, из которого откачивался воздух, обратили внимание ученых и изобретателей XVII в. на «громадную силу» атмосферного давления. Действительно, по сравнению с граммами или десятками граммов, приходящихся на 1 см² ветровых или водяных колес, 1 кгс на 1 см² являлся «громадной силой». «Сила» эта имела везде и, следовательно, обещала освобождение энергетики от локальной зависимости. Задача заключалась в создании вакуума или избыточного давления для образования разности энергетических потенциалов, дающей возможность получить работу.

* К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 23, стр. 388—389.

Тепловое расширение твердых тел известно было уже давно. В XVII в. было обнаружено тепловое расширение жидких тел и газов. Изменение объема жидких тел при изменении температуры использовалось при изготовлении первых жидкостных термометров, хотя тогда еще не отдавали себе отчета в том, что же измеряют эти приборы.

Наконец, третьей предпосылкой для создания теплового двигателя являлось изучение свойств водяного пара. Практически еще до нашей эры люди знали об упругих свойствах водяного пара, получаемого при кипячении воды в закрытом объеме. В начале XVI в. Леонардо да Винчи сделал набросок паровой пушки, указав на то, что она была изобретена Архимедом. В середине XVI в. в работах Кардана отмечается способность пара конденсироваться. Правда, знания о свойствах водяного пара не отличались точностью. Еще в XVIII в. многие ученые считали пар воздухом, выделяющимся из воды при ее нагревании.

Но накопленных знаний оказалось достаточно для изобретателей, решавших задачу о водоподъеме. В своих опытах по исследованию удельного объема водяного пара (1601 г.) итальянец Джамбаттиста делла Порта показал возможность подъема воды (рис. 4.1) давлением пара на ее поверхность, причем необходимость кипятить всю поднимаемую воду исключалась применением отдельного сосуда — парогенератора — предшественника парового котла. Позднее француз Соломон де Ко описывал «страшную силу» пара, который мог разрывать металлический сосуд и выбрасывать воду высоким фонтаном (1623 г.). Таким образом намечались пути, которые вели к использованию тепловой энергии или «движущей силы огня».

Знания в области теории тепла в то время были весьма поверхностными. Термодинамика как наука о взаимопревращениях тепловой и механической энергий начала складываться только с середины XIX в. Становление практической теплоэнергетики базировалось на познании ряда явлений и свойств, к которым можно отнести: атмосферное давление, расширение газов от нагревания, упругость водяного пара, получаемого кипячением воды, конденсация пара при охлаждении. Эти сведения тогда еще не были уточнены, систематизированы, но они дали толчок практике, а практика, в свою очередь, создала предпосылки для обобщения проверенных опытом знаний.

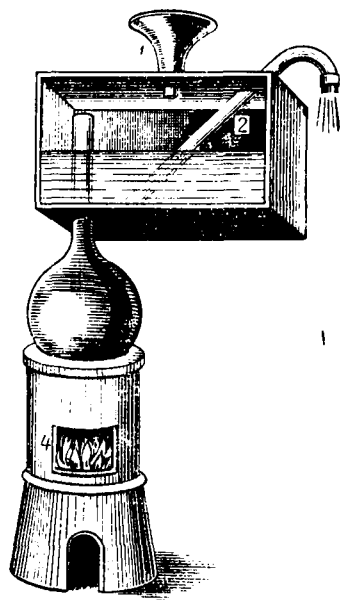


Рис. 4.1. Прибор Порта:

1 — отверстие для наливания воды; 2 — водоподъемная труба; 3 — генератор пара; 4 — топка

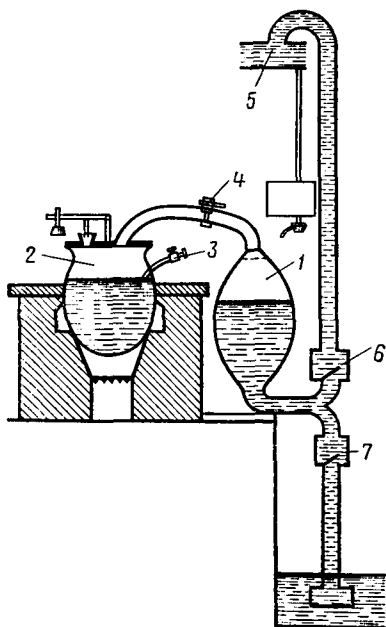


Рис. 4.2. Водоподъемник Севери (1698 г.)

Преодоление зависимости от местных условий и возможность концентрации значительных мощностей всецело зависят от свойств источника энергии, удельной энергоемкости самого энергоносителя. Источник тепловой энергии — топливо — имел по сравнению с известными в то время другими источниками самую высокую энергоемкость. Поэтому поиски нового двигателя неизбежно приводили к тепловому двигателю.

Весь процесс перехода от гидроэнергетики к теплоэнергетике можно разделить на три этапа: а) двигатель неотделим от исполнительного механизма (или рабочей машины); б) двигатель конструктивно обособляется от рабочей машины — потребителя энергии, но еще не становится вполне самостоятельным; в) двигатель становится универсальным.

НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД РАЗВИТИЯ ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ранние попытки создания теплового двигателя как двигателя, не зависящего от местных условий, были связаны с решением задачи водоподъема. Устройством такого рода, в котором двигатель конструктивно слит с потребителем энергии, явился паровой водоподъемник англичанина Т. Севери, запатентованный им в 1698 г.

В водоподъемнике Севери (рис. 4.2) вода в котел подавалась через кран 3, пар из котла 2 через открытый кран 4 поступал в камеру 1 и вытеснял из нее воду через нагнетательный клапан 6 при закрытом всасывающем клапане 7 в верхний резервуар 5. Затем кран 4 закрывался и камера поливалась холодной водой из специального резервуара. Пар в камере конденсировался, давление снижалось и вода заполняла камеру 1 через всасывающий клапан 7. Затем цикл повторялся.

Соприкосновение пара с холодной водой в камере, которая являлась одновременно и двигателем и насосом, приводило к крайней неэкономичности установки, использующей на работу водоподъема только 0,5% теплоты, заключенной в топливе. Тем не менее, острая нужда в двигателе для откачивания воды из рудников и шахт привела к некоторому распространению установки Севери. Более того, Севери предлагал объединить его установку, способную выполнять

единственную функцию — подъем воды, с водяным колесом для придания ей свойств универсального двигателя.

Второму этапу становления теплового двигателя, когда он конструктивно отделился от машины-орудия, предшествовала работа ряда ученых и изобретателей. Энгельс писал: «Паровая машина была первым действительно интернациональным изобретением... Паровую машину изобрел француз Папен, но в Германии. Немец Лейбниц... подсказал ему при этом основную идею: применение цилиндра и поршня» *. Можно указать также, что эта идея, вытекавшая из практики устройства поршневых насосов, лежала и в основе попыток построения теплового двигателя голландским ученым Гюйгенсом (1681 г.) и голландским аббатом Готфрейлем (1678 — 1682 гг.), что расширяет число участников «первого действительно интернационального изобретения».

Большая заслуга Папена состоит в том, что, исследуя работу пара в полости цилиндра, ограниченной подвижным поршнем, он впервые правильно описал последовательность процессов термодинамического цикла парового двигателя. В машине Папена все основные процессы парового двигателя (образование пара, превращение тепловой энергии в механическую и конденсация пара) протекали в одном агрегате — цилиндре с поршнем. Узловыми моментами последующей истории развития парового двигателя явилось отделение от цилиндра сначала котла, а потом конденсатора.

В установке Севери двигатель был уже отделен от котла и в то же время объединен с насосом, поверхность воды в котором служила как бы общим поршнем для двигателя и насоса. Применение настоящего поршня позволило сделать существенный шаг вперед в обособлении двигателя от орудия. Этот шаг, характерный для второй фазы становления теплового двигателя, удобно проследить на водоподъемной установке Ньюкомена — Коули. Эти изобретатели также решали задачу, связанную с откачиванием воды из рудника. Работа сводилась к необходимости периодического подъема длинной насосной штанги, выходящей на поверхность земли; опускалась же штанга под действием собственного веса. Таким образом, периодичность работы насоса простого действия, установленного на дне шахты, хорошо согласовалась с периодичностью работы пара в полости двигателя (рис. 4. 3).

При опускании насосной штанги 1 и груза 2 поршень 3 поднимался и в освобождающееся под ним пространство через открытый кран 4 поступал пар из котла 5, где давление лишь слегка превышало наружное (атмосферное) давление. При достижении поршнем верхнего положения кран 4 закрывался и кран 6 открывал доступ в полость холодной воде из резервуара 7 по трубке 8. Холодная вода конденсировала пар, в цилиндре образовывался вакуум, и атмосферное давление возвращало поршень вниз, производя подъем насосной штанги.

* К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 20, стр. 431.

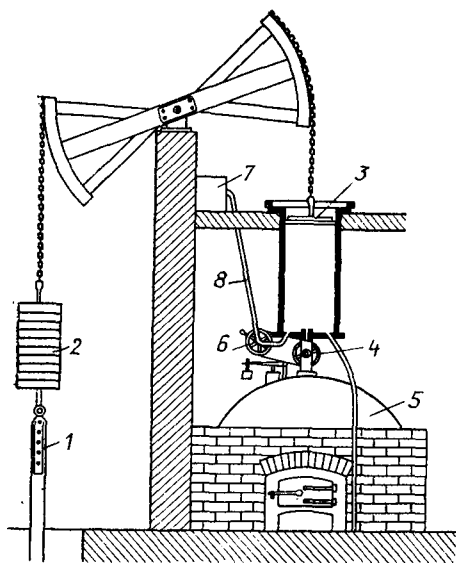


Рис. 4.3. Паровая водоподъемная установка Ньюкомена — Коули

Отделение двигателя от насоса давало возможность изменять соотношение диаметров их поршней и получать высокое давление в насосе при низком давлении в двигателе, а следовательно, поднимать воду с больших глубин при низком давлении пара в котле. Так, одна из реальных установок, построенных в Англии, поднимала воду на высоту 80 м, и, следовательно, давление на поршень насоса должно было быть 8 кгс/см². Поршень насоса имел диаметр в 4 раза меньший, чем поршень двигателя. Следовательно, отношение площадей поршней насоса и двигателя было равно 16, а поэтому и давление на поверхность поршня двигателя должно было составлять всего 0,5 кгс/см². Это давление на поршень дви-

гателя легко достигалось путем получения под поршнем разрежения при вбрызгивании воды; рабочее давление было равно 1 кгс/см² минус 0,5 кгс/см² (давление под поршнем).

Насосы описанной конструкции применялись почти столетие, но использовались они весьма ограниченно из-за своего недостатка — прерывности в работе. Тем не менее они подготовили условия для следующего шага в развитии теплоэнергетики — становления универсального двигателя.

ПОСТРОЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Независимость двигателя от локальных условий важна, но недостаточна для широкого перехода к новой энергетике. Чтобы двигатель стал универсальным, необходимо достичь универсальности его применения. Тепловой двигатель частного назначения, работавший дискретно, оказался непригодным для привода разнообразных рабочих машин развивавшегося мануфактурного производства. В XVIII столетии были сделаны первые попытки создать механические транспортные установки, снабженные паровым двигателем. Но и здесь требовалась непрерывная отдача работы. На рис. 4.4 в качестве примера показана паровая повозка для перевозки крупных артиллерийских орудий, построенная в 1769 г. французом Жозефом Кюньо.

Непрерывная отдача работы потребителю могла быть достигнута несколькими путями, которые в разное время и с разным

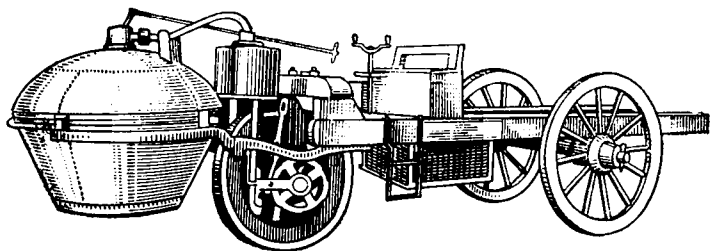


Рис. 4.4. Паровая повозка Кюньо

успехом были реализованы. Так, в 30—70-х годах XVIII в. неоднократно выдвигались предложения осуществить непрерывность отдачи энергии от двигателя прерывного действия за счет механического потенциального аккумулирования энергии. Другим направлением было кинетическое аккумулирование, когда на вращающийся вал поршневого двигателя насаживался маховик с достаточно большой массой. Возможно было также создание роторных (турбинных) двигателей, но эти двигатели по самой своей природе являлись быстроходными и поэтому неприемлемыми для техники XVIII столетия. Быстроходных исполнительных механизмов или преобразователей энергии, каковыми впоследствии стали электрогенераторы, тогда еще не было.

Проблема непрерывности передачи работы нашла свое практическое решение во второй половине XVIII в. суммированием работы нескольких полостей поршневого парового двигателя. Это суммирование можно обеспечить, либо суммируя работу двух (и более) полостей двух (и более) однополостных цилиндров, либо суммируя работу двух полостей одного цилиндра. Первый путь был реализован в многоцилиндровых двигателях, второй — в двигателях двойного действия.

Метод суммирования работы двух цилиндров был впервые предложен и детально разработан И. И. Ползуновым. В стремлении сконструировать универсальный двигатель, «...способный по воле нашей что потребно исправлять», он исходил из кризиса гидроэнергетики, остро проявлявшегося в горнорудной промышленности России. Ползунов поставил задачу радикального переворота в энергетике путем замены гидравлических установок паровыми машинами универсального характера.

В проекте своего универсального двигателя (1763 г.) Ползунов ввел суммирование работы двух цилиндров на общий вал. По этому проекту (рис. 4.5) поршень 1 опускаясь под давлением атмосферного воздуха, отдавал механическую работу валу 3 и одновременно поднимал поршень 2 другого цилиндра. При опускании поршня 2 происходило обратное распределение работы. Вал 3 приводился в движение непрерывно, то от одного, то от другого цилиндра. От вала движение передавалось штангам 4, двигавшим зуб-

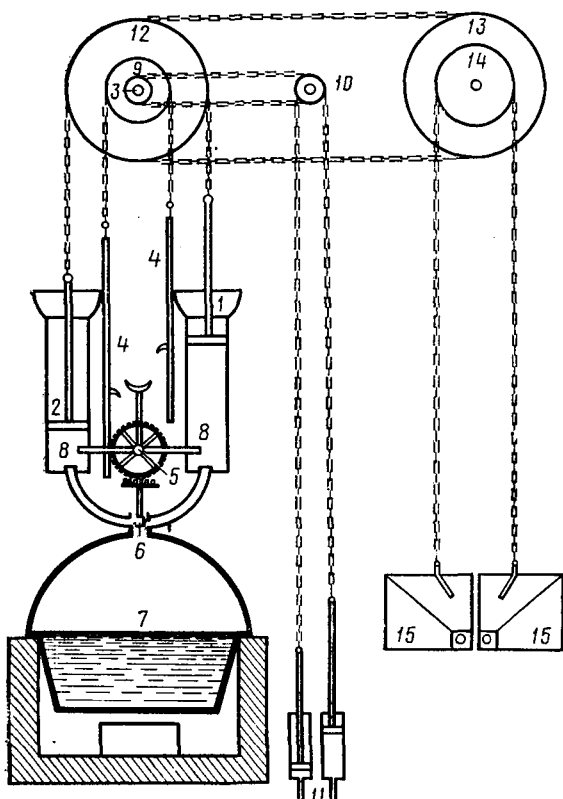


Рис. 4.5. Схема проекта универсального двигателя
И. И. Ползунова

шиной, и мог приводить в действие орудия, непрерывно потребляющие энергию, с помощью двух цепей, передающих работу непрерывно в двух направлениях. Двигатель не ограничивал свободу выбора направления движения орудия, так как не использовал сил тяжести, а также позволял изменять размах и усилие путем соответствующего подбора диаметров передающих шкивов. Кроме того, в конструкции Ползунова впервые тепловой двигатель мог осуществлять групповой привод, отмеченный позднее как этап в развитии машин.

Рецензент проекта президент Берг-коллегии И. А. Шлаттер дал высокую оценку работе Ползунова, но не сумел понять его основного замысла — замены водяных колес, сковывавших развитие производства, паровыми машинами. Поэтому Шлаттер предложил Ползунову осуществить комбинированную установку: паровым насосом поднимать воду и направлять ее на водяные колеса. Ползунов не принял рекомендации Шлаттера и в 1765 г. построил двигатель большой мощности для воздухообеспечения металлургии.

чатые шестерни механизма, управляющего кранами 5 и 6, которые поочередно подавали в цилиндры двигателя то пар из котла 7, то охлаждающую воду по трубам 8. От главного вала двигателя движение передавалось через шкивы 9 и 10 насосам 11, нагнетавшим воду в верхний резервуар, откуда она расходовалась самотеком на питание парового котла и охлаждение пара в цилиндрах. Работа внешнему потребителю — воздуходушным мехам 15 — передавалась через шестерни 12, 13 и 14.

Из описания двигателя видно, что он выполнял широкий ряд функций, недоступных для насосных двигателей. Он представлял собой самостоятельный двигатель, не связанный с рабочей ма-

ческих печей. Двигатель (рис. 4.6) имел два рабочих цилиндра 1, двигавших балансиры 2-2 и 3-3, от которых движение передавалось двум громадным воздуходушным мехам 10. С малого балансира 4 через штангу 6 и колесо 7 движение передавалось пароводорас-

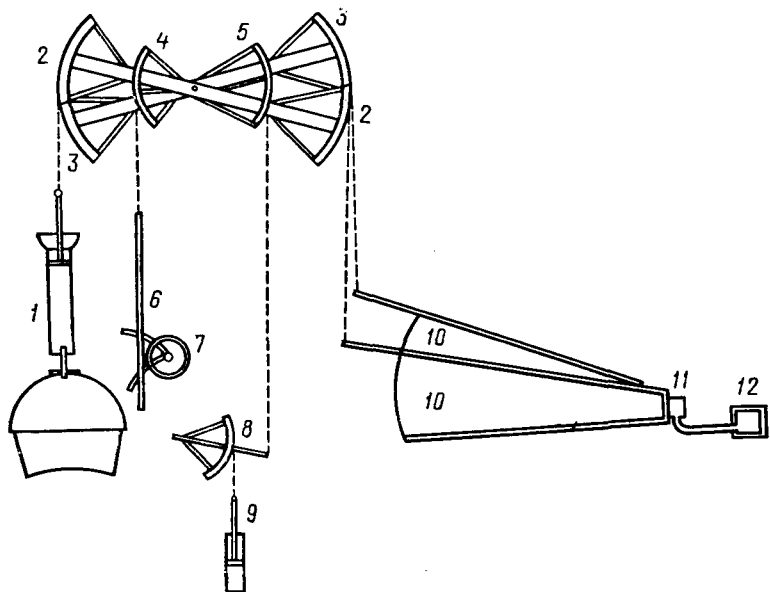


Рис. 4.6. Схема воздуходувной установки Ползунова (1765 г.)

пределительному механизму, а с балансира 5 через полубалансир 8 — к насосам 9. Через общую камеру 11 сжатый воздух подавался в аккумулятор дутья — «воздушный ларь» 12, из которого он по трубам распределялся между группой медеплавильных печей.

Ползунов значительно упростил установку и, отказавшись от промежуточного носителя энергии (в виде поднятой воды), более чем вдвое увеличил ее экономичность.

Однако в феодальной крепостнической России экономическая база для внедрения паровых двигателей отсутствовала. Поэтому после Ползунова строительство паровых машин в России не велось больше чем полстолетие.

Дальнейшие попытки создать универсальный двигатель связаны с промышленным переворотом в последней трети XVIII в.

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ПЕРЕВОРОТ И ДВИГАТЕЛЬ УАТТА

Промышленный переворот представлял собой замену ручного ремесленного и мануфактурного производства машинным фабрично-заводским производством.

Революция в промышленности началась в середине XVIII в. в Англии с возникновением и внедрением в производство технологи-

ческих машин, заменявших искусную руку рабочего. Первыми такими машинами оказались ткацкие станки, в которых ручное перемещение челнока было заменено механическим, и прядильные станки, в которых были применены механическая вытяжка и кручение нити. Ручной привод очень скоро уступил место конному. В 1769 г. в Англии была запатентована машина с большим количеством веретен и приводом от водяного колеса, сохранившая и поныне в названии отзвук своего происхождения: «ватер-машина» («ватер» — вода).

Рост спроса на машины, строившиеся уже не для каждого конкретного промышленного объекта, а на рынок, и ставшие товаром, привел к возникновению машиностроения, новой отрасли промышленного производства. Зарождалось производство средств произ-

водства. Широкое распространение технологических машин сделало совершенно неизбежной вторую фазу промышленного переворота — внедрение в производство универсального двигателя.

Если старые машины (песты, молоты и т. п.), получавшие движение от вращающихся валов водяных колес, были тихоходными и обладали неравномерным ходом, то новые, особенно прядильные и ткацкие, потребовали вращательного движения с большой скоростью. Только это могло обеспечить достаточную производительность станков и повысить степень равномерности натяжения, чтобы не допускать разрыва хлопчатобумажных, шерстяных или льняных нитей.

Таким образом, характеристика «универсальности по техническому применению» в процессе развития первой фазы промышленного переворота приобрела новые конкретные черты: универсальный двигатель должен отдавать работу в форме однонаправленного, непрерывного и равномерного вращательного движения.

В этих условиях неизбежно должны были появиться конструкции двигателей, способные удовлетворить назревшим требованиям производства. Десятки конструкторов и изобретателей стремились прежде всего приспособить освоенный многолетней практикой двигатель Ньюкомена — Коули для равномерного вращения шкивов прядильных и ткацких станков. Был использован весь арсенал техники, особенно техники передаточных механизмов, были испытаны все методы, дававшие возможность преобразовать работу поступательного движения поршня в работу вращательного движения вала.

В ходе промышленного переворота за последнюю четверть XVIII в. в одной только Англии было выдано свыше десятка патентов на универсальные двигатели самых разнообразных систем и конструкций. Однако многие участники изобретения универсального двигателя оказались забытыми. Обширная литература по истории паровых двигателей до самого последнего времени выделяла из числа изобретателей универсального двигателя одного Д. Уатта.

На это есть свои причины. Во-первых, Уатт и его компаньон, заводчик Болтон, запатентовав такие приемы использования пара, как конденсация в отдельном конденсаторе и применение избыточного давления, крайне ограничили возможности других изобретателей.

Вторая причина столь большой известности Уатта состояла в том, что его двигатель (рис. 4.7), будучи равноценным с другими в отношении универсальности по техническому применению, был вдвое экономичнее по расходу топлива благодаря отделенному конденсатору. Экономичность двигателя и коммерческий талант заводчика Болтона сделали Уатта одним из наиболее популярных изобретателей в мире.

Уатт начал свою работу в 1763 г. почти одновременно с Ползуновым, но с иным подходом к проблеме двигателя и в совершенно другой обстановке. Ползунов начинал с общезнергетической постановки задачи о полной замене зависящих от локальных условий гидросиловых установок универсальным тепловым двигателем, но не смог реализовать свои смелые планы в крепостной России. Уатт начал с частной задачи — повышения экономичности двигателя Ньюкомена, возникшей в связи с порученной ему как механику университета в Глазго (Шотландия) работой по починке действующей модели водоотливной паровой установки.

В 1769 г. Уатт запатентовал паровой двигатель с отдельным конденсатором. Конструкция этого двигателя уже содержала паровой котел, цилиндр, конденсатор. Отделение конденсатора явилось существенным шагом в поисках путей снижения расхода топлива, но не разрешило основную задачу того времени — получение непрерывного вращательного движения; универсальный двигатель с таким движением может работать и без конденсатора.

Благоприятные условия деятельности Уатта — денежная поддержка капиталистов, общение с учеными, поддержка в парламенте и, наконец, возможность использования высококвалифицированных инженерных кадров — позволили ему осуществить ряд ценных мероприятий, резко повысивших экономичность парового двигателя. Главные из них — введение паровой рубашки, уменьшавшее температурные колебания стенок цилиндра и потерю пара от конденсации на них, и расширение пара в полости цилиндра.

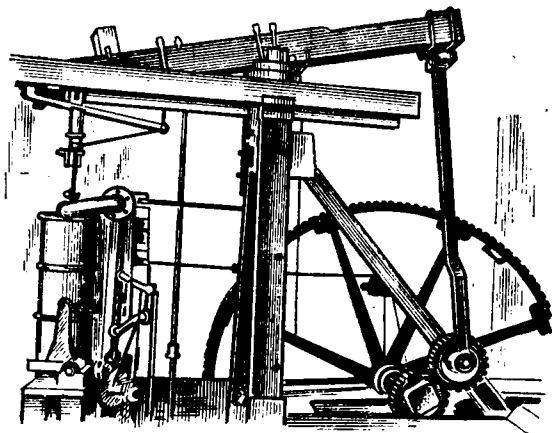


Рис. 4.7. Универсальный паровой двигатель Уатта

Расширение пара (правда, очень незначительное) применялось уже в двигателях Ньюкомена, где оно являлось результатом прекращенияпуска пара при подходе поршня к мертвой точке во избежание резких толчков. Уатт исследовал экономический эффект более раннего прекращенияпуска пара в цилиндр и ввел расширение пара на значительной части хода поршня. Это резко снижало удельный расход пара. Стремясь компенсировать потерю мощности, вызванную отсечкой пара, без увеличения размеров цилиндра, Уатт предложилпускать пар во вторую полость цилиндра. Таким путем он пришел к двигателю двойного действия, в котором осуществляется один из методов суммирования работы полостей.

Теперь уже не составляло особого труда построить двигатель с вращательным движением: нужно было только применить маховик для достижения равномерности вращающего момента. Уатт писал, что применить кривошипно-шатунный механизм к «паровой машине было так же легко, как воспользоваться ножом, предназначенным для резки хлеба, для разрезания сыра».

Чтобы обойти патентные запреты, Уатт использовал планетарную передачу, тем самым увеличив вдвое число оборотов вала, что привело к четырехкратному увеличению выравнивающего действия маховика. Уатт не отказался от балансира, используя для его соединения со штоком двигателя параллелограмм, теория которого значительно позднее была разработана П. Л. Чебышевым.

Наконец, Уатт ввел центробежный регулятор скорости, изменявший сечение паропровода, а следовательно, и подачу пара к двигателю при изменении числа оборотов вала. Так же, как и регулятор уровня воды в котле Ползунова, этот регулятор явился одним импульсным механическим регулятором простого действия с одним регулируемым параметром. Теория центробежных регуляторов была разработана И. А. Вышнеградским только в 1877 г.

Двигатели Уатта начали решительно вытеснять водяное колесо. Если за 70 лет до 1769 г. было установлено около 140 паронасосных установок, из которых около 100 работали по откачке воды на рудниках и шахтах, а остальные—в водопроводных схемах различного назначения (городские, промышленные, парковые), то, начиная с 1775 г., количество паровых установок резко возросло.

Количественное увеличение и внедрение в промышленность и транспорт тепловых установок, характерное для конца XVIII и всего XIX столетия, сопровождалось увеличением единичной их мощности и повышением к. п. д.

СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК И ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ПАРОВЫХ МАШИН

Расширение сферы применения парового двигателя требовало все более и более широкой универсальности. Началась специализация тепловых силовых установок. Продолжали совершенствоваться водоподъемные паросиловые установки, к. п. д. которых возрос примерно до 6—8%. Об их размерах можно судить по ставшей зна-

менитой огромной установке для осушения Гарлемского залива в Голландии: цилиндр двигателя имел диаметр 3,66 м, ход поршня составлял 3,45 м. Наибольшая высота подъема, достигнутая водоподъемниками, составляла 650 м.

В XIX столетии получили дальнейшее развитие и шахтные подъемные паросиловые установки, для которых была решена проблема тормоза и изменения направления вращения вала (реверса).

Развивавшееся металлургическое производство стимулировало совершенствование воздухоудных паросиловых установок, которые в первой половине XIX в. представляли собой балансирные двигатели. В середине столетия по мере роста инерционных нагрузок от громоздких балансиров стали отказываться. Появились двигатели типа «тандем», а в конце столетия — центробежные воздухоудки с быстроходными паровыми машинами.

В металлургическом производстве широкое применение нашли прокатные паросиловые установки и паровые молоты. От старых хвостовых молотов стали отказываться к середине XIX в. Новое решение было найдено в 1840 г. Дж. Несмитом, объединившим паровой двигатель с молотом: поршень, соединенный непосредственно с бойком молота, поднимался паром избыточного давления, а затем падал под действием собственного веса. Впоследствии в паровых молотах ввели «верхний пар» и к собственному весу поршня с бойком добавилось значительное усилие от давления пара на верхнюю поверхность поршня.

В развитии паровых машин самостоятельное направление составили локомобили — передвижные паросиловые установки, история которых начинается еще с 1765 г., когда английский строитель Дж. Смитон разработал переносную установку.

Отдельные конструкции локомобилей с двигателями двойного действия, работавшие за счет пара избыточного давления на выхлоп в атмосферу и установленные вместе с котлом на колесах, сооружались, начиная с 20-х годов XIX в. Однако заметное распространение локомобили получили только с середины XIX в. Обычно локомобили имели небольшую мощность (порядка 4—8 л. с.) с избыточным давлением пара 3—4 ат и значительной для машин того времени быстроходностью (125—150 об/мин).

Дальнейшее увеличение к. п. д. паросиловых установок было достигнуто введением многократного расширения пара последовательно в двух, трех и — реже — четырех цилиндрах.

После 1800 г., когда окончился десятилетний срок привилегий фирмы «Уатт и Болтон», доставивших компаньонам громадные капиталы, другие изобретатели паровых двигателей получили, наконец, свободу действий. И почти сразу были реализованы запатентованные, но не применявшиеся Уаттом прогрессивные методы: высокое давление и двойное расширение.

Отказ от балансира и использование многократного расширения пара в нескольких цилиндрах привели к созданию новых конструктивных форм паровых двигателей. Двигатели двукратного расширения стали оформляться в виде двух цилиндров: высокого давле-

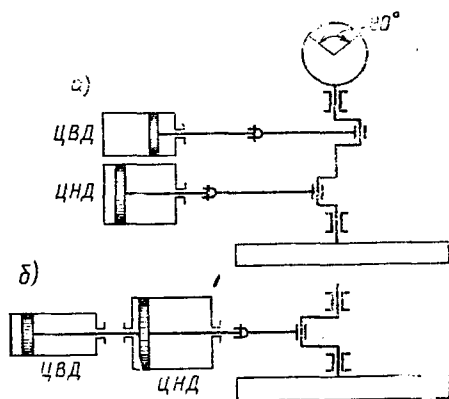


Рис. 4.8. Схема расположения цилиндров и вала машин компаунд (а) и тандем (б)

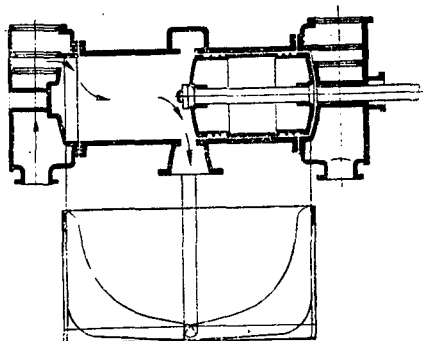


Рис. 4.9. Схематический разрез прямооточной паровой машины

ния (ЦВД) и низкого давления (ЦНД) либо как компаунд-машины с углом заклинивания между кривошипами 90° (рис. 4.8, а), либо как тандем-машины, в которых оба поршня насажены на общий шток и работают на один кривошип (рис. 4.8, б).

Кривошипы машин тройного расширения стали заклинивать под углом 120° . Распределение мощности на ряд цилиндров повлекло за собой повышение к. п. д. за счет использования высокого перепада давлений и уменьшения теплообмена между паром и стенками цилиндров: теперь каждый цилиндр работал в лучшем для себя режиме. Эта мера оказалась полезной и для улучшения динамики двигателя, уравнивания движущихся масс и способствовала дальнейшему увеличению скорости валов двигателей.

Большое значение для повышения к. п. д. паровых двигателей имело использование с середины XIX в. перегрева пара, на эффект которого еще в 30-х годах указывал французский ученый Г. А. Гирн.

Однако если относительно невысокий перегрев не вызывал особых затруднений при введении пароперегревателей в газоходы паровых котлов, то трудности его использования в цилиндрах паровых машин оказались более значительными. Смазка и уплотнение не выдерживали перегретого пара. Кроме того, перегретый пар вызывал коробление плоских золотников, особенно двойных, широко применявшихся в регулируемых машинах, приводил к заклиниванию или пропускам в крановых распределительных механизмах. Потребовалась длительная работа по конструированию цилиндрических золотников и клапанных распределительных механизмов, освоению технологии получения минеральных смазочных масел, способных выдерживать высокую температуру, и по конструированию новых типов уплотнений, в частности с металлической набивкой, чтобы постепенно перейти от насыщенного пара к перегретому до $200\text{--}250^\circ\text{C}$.

Последний крупный шаг в развитии паровых поршневых двигателей — изобретение «прямоточной» паровой машины. На рис. 4.9

дан схематический разрез прямоточной паровой машины: стрелкой показан путь пара от золотника (или клапана) к выпускным отверстиям, расположенным в середине цилиндра по его окружности. Внизу в координатах давление — объем показаны индикаторные диаграммы работы пара в полостях цилиндра. Это изобретение было сделано немецким профессором Штумпфом в 1908 г. в качестве попытки воспрепятствовать потере паровой машиной монополии в связи с внедрением паровых турбин и двигателей Дизеля. В отличие от обычных, у этой машины пар выпускался из цилиндра через широкое выходное сечение (ряд окон, расположенных по окружности посередине цилиндра и открываемых кромкой бочкообразного поршня). Свободный выход пара позволял прямоточной машине работать с более глубоким (до 0,075 ат) вакуумом, чем у обычных машин (порядка 0,2 ат), что в сочетании с возможностью высокого сжатия значительно сокращало расход пара. Принцип прямоточности из-за высокого перегрева пара (до 330°С перед впускным клапаном), малых вредных пространств и значительного числа оборотов не играл существенной роли. Прямоточный принцип использовали в цилиндрах низкого давления судовых машин двойного расширения для того, чтобы получить возможность работать с более глубоким вакуумом.

Во второй половине XIX в. в основном сложились все конструктивные формы паровых поршневых двигателей.

Несколько забегаю вперед, остановимся на последнем этапе развития паровых машин, когда их начали применять в качестве двигателей электрогенераторов электрических станций (с 80—90-х годов XIX в. по 10-е годы XX в.).

К первичному двигателю электрического генератора предъявлялось требование большой скорости, высокой равномерности вращательного движения и непрерывно возрастающей мощности. Последнее однозначно решило борьбу в пользу паровой турбины, мощность которой в 20-х годах XX в. достигла 20 000 кВт. В агрегатах до 2000 кВт использовали паровую машину.

В указанный период конструкторы паровых машин решали первые две задачи. Решение свелось к применению вертикальных многоцилиндровых машин тройного расширения. При этом, например, вертикальная машина мощностью около 1300 кВт развивала скорость 250 об/мин, а вертикальная машина тройного расширения (четыре цилиндра) мощностью 1600 кВт — 83,5 об/мин. Следует отметить, что с ростом мощности машины все труднее было увеличить ее быстроходность из-за увеличения инерции движущихся масс.

Возможности горизонтальных машин были еще меньше. Так, четырехцилиндровая горизонтальная машина тройного расширения мощностью 1400 кВт развивала только 72 об/мин.

Центробежные регуляторы, применявшиеся со времен Уатта, получили дальнейшее развитие в связи с предложением схемы регулирования с обратной связью (Фарко, 1873 г.) и теоретической разработкой регуляторов прямого и непрямого действия (И. А. Выш-

неградский, 1878 г.). Увеличение мощности машин потребовало увеличения мощности регулятора, а позднее — введения непрямого регулирования. В так называемых «плоских» регуляторах был использован инерционный принцип, получивший широкое распространение в последних моделях быстроходных машин, предназначенных для привода электрических генераторов.

Приведенные пределы технических возможностей поршневого парового двигателя — паровой машины, — являвшегося универсальным двигателем промышленности и транспорта в течение всего XIX в., показывают, что эти возможности уже не соответствовали потребностям, возникшим в конце XIX в. в связи со строительством электростанций.

Они могли быть удовлетворены только после создания нового теплового двигателя — паровой турбины.

РАЗВИТИЕ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

В первых паровых котлах применялся пар атмосферного давления. Прототипами котлов Ползунова, Ньюкомена и ряда других изобретателей послужили конструкции пищеварочных котлов, откуда и возник сохранившийся до наших дней термин «котел». Рост мощности пароатмосферных двигателей вызвал к жизни и поныне существующую и действующую тенденцию котлостроения: увеличение паропроизводительности — количества пара, производимого котлом в час.

Английский машиностроитель Д. Смитон устанавливал по два-три котла для питания паром одного цилиндра своих насосных установок. В частности, в 1777 г. по проекту Смитона была сооружена трехкотельная установка для откачивания воды из Кронштадтских морских доков. Другие конструкторы увеличивали активную поверхность нагрева котлов, организуя их обмуровку так, чтобы газы омывали не только дно, но и боковые стенки котла. Уатт сконструировал «вагонный» котел, получивший свое название по некоторому сходству со старинными вагонами. Дымоходы этого котла образовывали довольно развитую поверхность нагрева. Слегка вогнутые днища и боковые стенки котла обеспечивали достаточную прочность установок Уатта при избыточном давлении до 0,25 ат.

Однако если рост единичной мощности паросиловых установок требовал повышения паропроизводительности котлоагрегатов, то для увеличения к. п. д. были нужны более прочные котлы, так как рост к. п. д. связан с повышением давления пара. Так возникла вторая поныне существующая и действующая тенденция котлостроения: увеличение давления.

Эффект от увеличения давления стал более очевидным уже в 30-е годы XIX в. Изобретатель парового молота английский инженер Несмит писал, что в паросиловых установках «...стали применять высокое давление, ...которое заставляло бы инженеров старой школы упасть в обморок от страха. Но так как экономический результат этого повышенного давления пара очень быстро обнаружился в совершенно недвусмысленной форме фунтов, шиллингов и пенсов, паровые котлы высокого давления при конденсационных машинах получили почти всеобщее распространение». Правда, в то время переход к «высоким давлениям» означал только повышение котельного давления (сверх атмосферного) с 0,05—0,1 до 0,5—1,0 ат, но уже к концу XIX в. котельные давления достигали значений порядка 13—15 ат.

Требование повышения давления противоречило стремлению увеличить паропроизводительность котлоагрегатов. Шар — наилучшая геометрическая форма сосуда, подвергающегося большому внутреннему давлению, — дает минимальную поверхность при данном объеме, а для увеличения паропроизводительности необходима по возможности развитая поверхность. Наиболее приемлемым оказалось использование цилиндра — следующей за шаром геометрической формой в отношении прочности. Цилиндр позволяет сколь угодно увеличивать его по-

верхность за счет увеличения длины. Возник цилиндрический котел, примененный первыми наиболее решительными и смелыми приверженцами высокого давления. В 1801 г. О. Эванс в США построил паросиловую установку с чрезвычайно высоким для того времени давлением порядка 8—10 ат. Котел Эванса имел цилиндрическую форму с цилиндрической же внутренней топкой. В 1824 г. С. В. Литвинов в Барнауле разработал проект оригинальной паросиловой установки высокого давления (рис. 4.10) с прямоточным котлоагрегатом, состоявшим из оребренных труб. Насос высокого давления (до 50 ат) подавал воду в котел 3 («водокалитель»), вода перегревалась при высоком давлении и через дроссель поступала в «испаритель» 4, где при более низком давлении мгновенно испарялась; из цилиндра высокого давления (ЦВД) 1 пар направлялся во второй котел 6, затем поступал сначала в цилиндр низкого давления (ЦНД) 2, а потом в конденсатор 7; насос низкого давления 8 подавал конденсат в котел 6 (9 — циркуляционный насос).

Для увеличения котельного давления и паропроизводительности потребовалось уменьшение диаметра цилиндра (прочность) и увеличение его длины (производительность): котел превращался в трубу. Существовали два способа дробления котлоагрегатов: дробились газовый тракт котла или водяное пространство. Так определились два основных типа котлов — жаротрубные и водотрубные.

На рис. 4.11 схематически показан исторический процесс развития котлоагрегатов двух основных типов в первой половине XIX в. Исходным типом являлся простой цилиндрический котел 1. Затем газовые каналы, образуемые кладкой котла, дополняются внутренним каналом — жаровой трубой (2 — корнваллийский котел, названный так по месту первого применения), позднее стали применяться две жаровые трубы (3 — ланкаширский котел), а затем — большое количество так называемых дымогарных труб малого диаметра, либо продолжавших движение газов за топочной камерой к задней стенке котла (4 — «пролетный», или локомотивный, котел), либо поворачивавших поток газов на 180° с выходом в передней стенке котла (5 — шотландский котел, получивший широкое применение в XIX в. в качестве судового котла). Наконец, паровозный котел 6 завершил развитие жаротрубных котлов.

Дробление водяного пространства котлов в виде «двоек» 7, «шестерок», «девяток» осуществлялось довольно широко в фабрично-заводских установках, причем в зависимости от расположения нижних труб такие котлы подразделялись на котлы с кипятильником и котлы с подогревателем. На рис. 4.11, 8 представлен котел «шестерка» с подогревателем, у которого укороченные нижние трубы подогреваются топочными газами после верхних и служат для подогрева воды, поступающей в котел (питательной воды).

В связи с ростом давления потребовалось уменьшить диаметр труб примерно до 100 мм. Тонкие трубы предоставляли широкие возможности для самых разнообразных комбинаций поверхностей нагрева при условии обеспечения надежной циркуляции воды по трубам котла. Первые опыты, не учитывавшие роли циркуляции, были неудачными. Сконструированный немецким инженером Э. Альбаном, работавшим в Англии, однокамерный котел высокого давления (до 40 ат; рис. 4.11, 9) показал, что в глухих трубках котла образуются и застаиваются пузыри, вызывающие перегрев стенок. Позднее Альбан соорудил двухкамерный котел (рис. 4.11, 10), расположив трубы с некоторым наклоном для лучшей циркуляции пароводяной смеси. Двухкамерный котел получил большое распространение в ряде модификаций, предлагавшихся разными фирмами.

Во второй половине XIX в. были разработаны достаточно экономичные и надежные парогенераторы, которые не только удовлетворяли потребности стационарной и транспортной энергетики рассматриваемого периода, но и служили базой для следующего постепенного перехода паропроизводительности от десятков до сотен тонн пара в час.

К этому времени практика котлостроения неизбежно привела к единственной рациональной принципиальной основе конструирования парового котла в виде той или иной комбинации стальных тонкостенных труб небольшого диаметра. Эти трубы при толщине стенки 3—4 мм позволяют выдерживать очень высокие давления. Потребная же производительность достигается за счет суммарной длины труб, входящих в конструкцию котлоагрегата. Таким образом, тонкая стальная труба в качестве основного конструктивного элемента котла в состоянии удов-

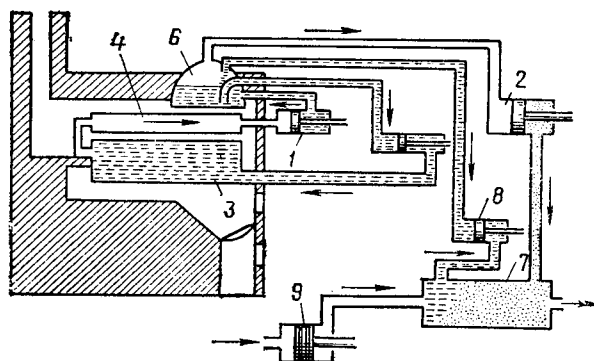


Рис. 4.10 Схема паросиловой установки С. В. Литвинова
(стрелками показаны пути воды и пара)

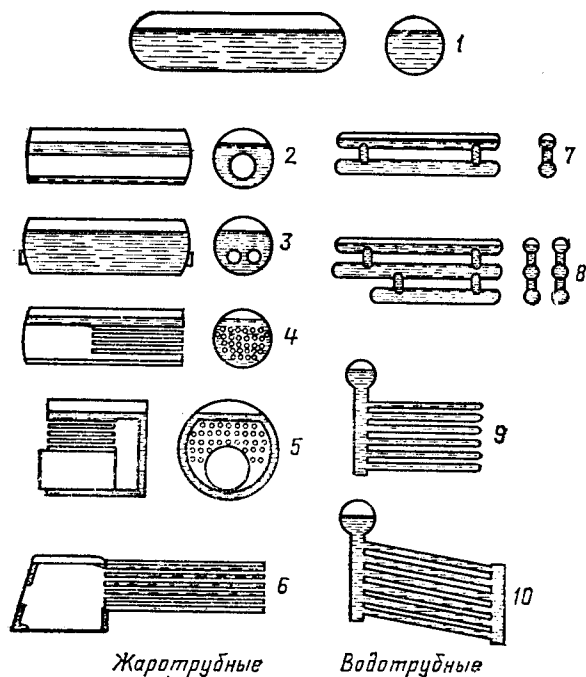


Рис. 4.11. Дробление водяного пространства и газо-
вого тракта котлов

летворять двум основным тенденциям развития паротехники: увеличению давления и производству больших количеств пара.

К середине XIX в. сложился конструктивный тип парового котла с пучком прямых слегка наклонных труб, вальцованных в плоские стенки двух камер (рис. 4.12, 1), получивший название «горизонтального» водотрубного котла. К концу XIX в. дальнейшее увеличение удельной паропроизводительности паровых котлов судовых установок было достигнуто и при разработке другого типа водотрубных котлов, названных «вертикальными». Основным элементом новых водотрубных котлов — вертикальный или близкий к вертикальному пучок труб, вальцованный в цилиндрические стенки барабанов (рис. 4.12, 2).

Оба типа котлов открывали пути для значительного увеличения поверхности нагрева. Для повышения котельного давления более перспективными оказались «вертикальные» котлы с их барабанами, выдерживающие большие давления по сравнению с плоскими стенками камер.

Одним из первых высококачественных секционных водотрубных котлов явился котел фирмы Бабкок — Вилькокс. В конструктивной форме, близкой к той, которая принесла этому котлу мировую известность, впервые он был продемонстрирован на Парижской выставке в 1867 г. (рис. 4.13).

Другим распространенным котлом с пучками параллельных труб был запатентованный в 1896 г. котел конструкции В. Г. Шухова. В том же году он демонстрировался на Всероссийской выставке в Нижнем Новгороде. В котле Шухова каждая отдельная секция представляла собой пучок из 19—21 труб, вальцованных в короткие барабаны с легко снимавшимися крышками, что позволяло иметь свободный доступ сразу к трубам всего пучка. Шухов разработал оригинальную конструкцию соединения секций болтами. Это дало возможность из отдельных пучков (по два пучка по вертикали и по два — четыре пучка по горизонтали) составлять котел с поверхностью нагрева 50—300 м². Разборный котел Шухова был транспортабелен, отличался невысокой стоимостью и малой металлоемкостью.

В патентной заявке на свой водотрубный котел Шухов писал: «...В случае надобности, обмуровка таких котлов заменяется особою одеждою, состоящей из циркулярных труб. Такая одежда образует топочное пространство, в котором помещается котель». Таким образом, Шухов впервые предложил топочный экран, получивший в наше время широкое применение.

Один из примеров стационарных вертикальных котлов — четырехбарабанный водотрубный котел, предложенный американцем Стирлингом в 1894 г. Возможное разнообразие компоновок котлов такого типа сделало их весьма распространенными, а некоторые их конструктивные элементы сохранились и в современном котлостроении.

Одновременно с котлом Стирлинга в Германии заметно распространяется вертикальный водотрубный котел Гарбе, отличавшийся прямыми трубками и допускавший при многобарабанном выполнении те же возможности в компоновках, что и котел Стирлинга.

К концу XIX в. водотрубные паровые котлы позволяли в отдельных конструкциях получать суммарную поверхность нагрева свыше 500 м² и суммарную паропроизводительность свыше 20 т/ч пара. Однако задача повышения паропроизводительности не могла быть решена простым увеличением поверхности нагрева. Существенную роль здесь сыграло увеличение удельной (с 1 м²) паро-

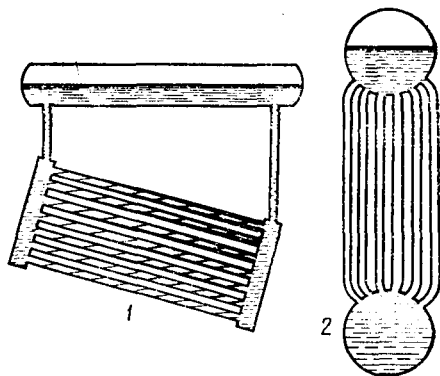


Рис. 4.12. Принципиальные конструктивные схемы водотрубных котлов:
1 — горизонтальный; 2 — вертикальный

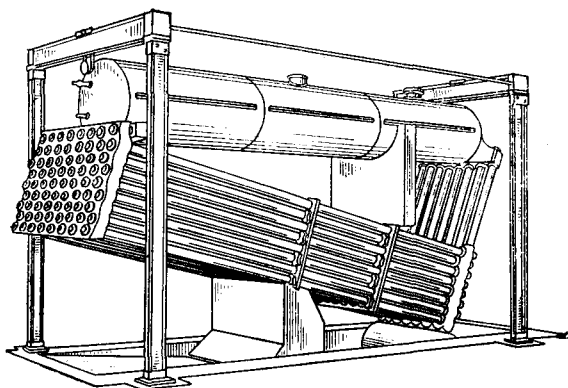


Рис. 4.13. Схематический рисунок горизонтального водотрубного парового котла системы фирмы «Бабкок — Вилькоккс» с вертикальными змееобразными секциями

производительности, которая к середине XX в. возросла в среднем в 10 раз. В рассматриваемый период проблема повышения удельной паропроизводительности только возникла; вместе с ней возникал и ряд вопросов, решение которых позволило позднее обеспечить высокую удельную производительность.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПАРОВОГО ТРАНСПОРТА

Универсальный паровой двигатель послужил основой технической революции на транспорте, в результате которой на смену гужевому транспорту пришли железные дороги, а на смену парусным судам — пароходы. Новый транспорт, обеспечивший неизмеримо более высокую пропускную способность, явился органическим звеном новой, машинной системы промышленного производства с ее массовым выпуском широчайшего ассортимента товаров, с ее колоссальной потребностью в перевозках сырья, горючего, фабрично-заводской продукции.

Вместе с тем сам процесс возникновения сухопутного и водного парового транспорта сыграл громадную роль в совершенствовании конструктивных форм и достижении высоких экономических показателей парового двигателя.

Главные требования, предъявлявшиеся к паровому двигателю транспортной установки, сводились к получению сравнительно небольшого веса двигателя, реверсивности и возможности запуска двигателя с любого положения частей его механизма (отсутствие мертвой точки). Первое сразу же определило транспортный паровой двигатель как двигатель избыточного давления. Среди строителей первых паровых транспортных агрегатов, использовавших избыточное давление, был французский инженер Ж. Кюньо, который, как указывалось выше, в 1769 г., задолго до возникновения острой потребности в универсальном паровом двигателе, спроектировал паровую повозку для перевозки тяжелых артиллерийских орудий. Осуществляя универсальность по техническому применению методом суммирования работы двух цилиндров простого действия (как несколько ранее Ползунов), он объединил их передаточные механизмы, действовавшие поочередно на ведущее колесо повозки (см. рис. 4.4). Придя к принципиально правильной конструкции двигателя, Кюньо не нашел способа снизить удельный вес котла, который, будучи самой крупной и тяжелой частью всей повозки, не обеспечивал двигатель достаточным количеством пара.

После прекращения действия патентов Уатта, в 1802 г., англичанин Р. Тревитик запатентовал двигатель избыточного давления для применения в самодвижущихся повозках. Однако Тревитик нашел менее удачное решение, чем Кюньо.

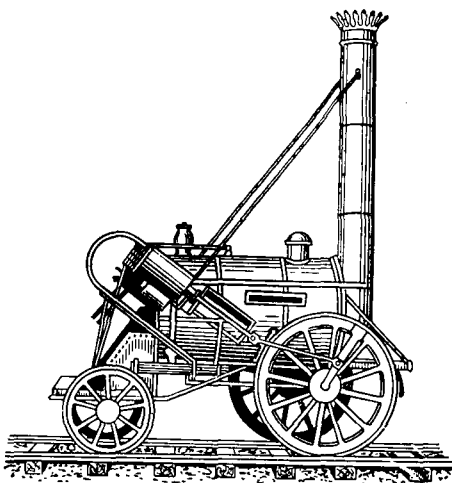


Рис. 4.14. Паровоз Дж. Стефенсона «Ракета» (1829 г.)

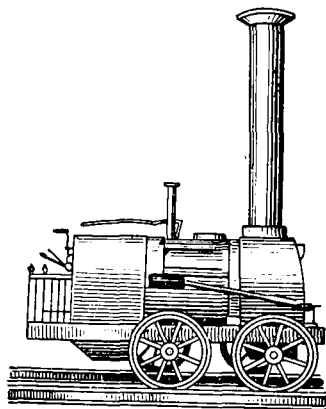


Рис. 4.15. Модель паровоза Черепановых

Он некритически применял к своему паровому автомобилю одноцилиндровый двигатель двойного действия со всеми присущими ему элементами, не исключая и маховик. Эту же ошибку Тревитик повторил в конструкции своего паровоза, совместив в нем два аккумулятора механической работы: маховик и паровоз в целом. Но Тревитиком был сделан и шаг вперед: он поместил топку внутри жаровой трубы.

Однако вплоть до применения наиболее эффективного метода увеличения удельной паропроизводительности котла — устройства в нем большого числа дымогарных труб — паровоз находился в состоянии своего младенчества. Используя впервые дымогарные трубы в котле своего паровоза «Ракета», английский инженер Дж. Стефенсон вышел победителем конкурса на лучший паровоз, организованного в 1829 г. Его «Ракета» (рис. 4.14) развивала скорость до 21 км/ч при массе поезда 17 т; позднее «Ракета» развивала неслыханную по тем временам скорость 45 км/ч, считавшуюся некоторыми медиками тех дней чуть ли не смертельной для человека. Стефенсона многие называют изобретателем первого реверсивного механизма, позволявшего на ходу переключать парораспределительный механизм машины с переднего хода на задний. Этот механизм сохранил за собой название «кулиса Стефенсона». В действительности кулиса эта была изобретена работавшим на заводе Стефенсона в Ньюкастле (Англия) инж. Вильямсом, который построил ее в 1842 г.

В России первыми конструкторами паровозов были отец и сын Черепановы. В 1834 г. они построили паровоз, перевозивший 3,5 т груза со скоростью 15 км/ч. Затем ими был построен второй паровоз, который мог перевозить груз массой 17 т. Паровоз был реверсивным и имел котел с большим числом дымогарных труб (рис. 4.15).

Таким образом, конструкторы паровозов впервые ввели в паросиловые установки производительные трубчатые котлы, многоцилиндровые двигатели, пар избыточного давления, безбалансирную конструкцию механизма, устройства для реверсирования.

Прогресс судовых двигателей был более медленным, так как судовая установка предъявила к своим конструкторам менее жесткие требования, чем сухопутная. Промышленный переворот привлек и к этой области применения парового двигателя значительную группу изобретателей. Здесь необходимо было преодоление привычных представлений. Если изобретатели первых паровозов не

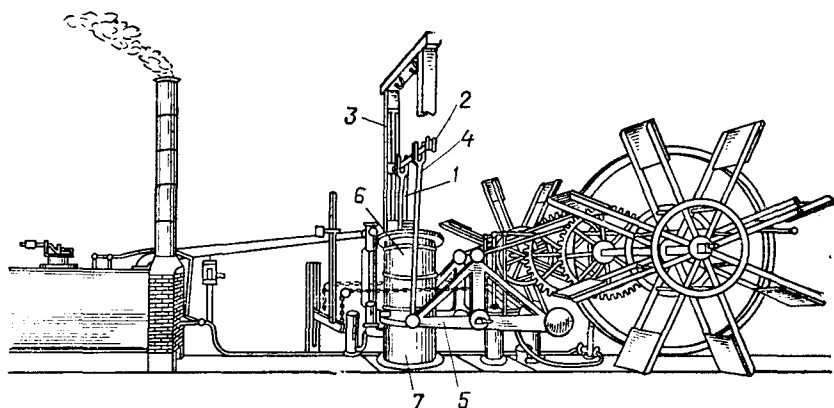


Рис. 4.16. Паровой двигатель парохода Фультона «Клермонт»:
1 — шток; 2 — крейцкопф; 3 — направляющая; 4 — шатун; 5 — баланси́р; 6 — пор-
шень; 7 — цилиндр

верили в то, что сцепление ведущих колес с гладким рельсом будет достаточным для движения поезда и применяли шестеренчатые рельсы и даже своеобразные «ноги» — толкачи (локомотив Брентона, 1813), то некоторые изобретатели первых пароходов не могли отказаться от весел как движителя. Между тем замена многих слабосильных гребцов одним мощным двигателем диктовала целесообразность устройства одного движителя — колеса или винта. Становление универсального двигателя, работавшего с паром избыточного давления, создало все предпосылки к использованию этого двигателя на водном транспорте.

Наибольшую известность получил пароход Р. Фультона «Клермонт», явившийся первым коммерческим судном, хотя механический перенос на судно стационарного двигателя с баланси́ром и маховиком (рис. 4.16) излишне усложнял и утяжелял установку.

В России постройка пароходов началась в 1815 г. В 1820 г., между С.-Петербургом и Кронштадтом курсировали уже четыре парохода, называвшиеся тогда «пироскафами». Позднее судовые машины строились на Ижорском заводе, машины для речных судов — на Пожевском заводе (с 1817 г.), на Мальцевских заводах, а позднее — на Сормовском. Ижорскому заводу принадлежит первенство постройки и внедрения безбаланси́рного судового двигателя на пароходе «Геркулес» в 1832 г.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

К 30—50-м годам XIX в., в связи с ростом капиталистического фабрично-заводского машинного производства, возникла задача по созданию нового двигателя. Эта задача представляла собой социальный заказ, который субъективно основывался на неправильном представлении о том, что, будучи снабженным дешевым мало-мощным двигателем, ремесленник будет иметь возможность выдержать конкуренцию с крупным капиталистическим производством. Развитие паровых силовых установок подсказало изобретателям конкретные формы нового дешевого и экономичного двигателя в виде «машины без котла», наиболее дорогой и громоздкой части паросиловой установки. Отказ от котла означал сжигание горючего внутри самого двигателя, который еще до своего возник-

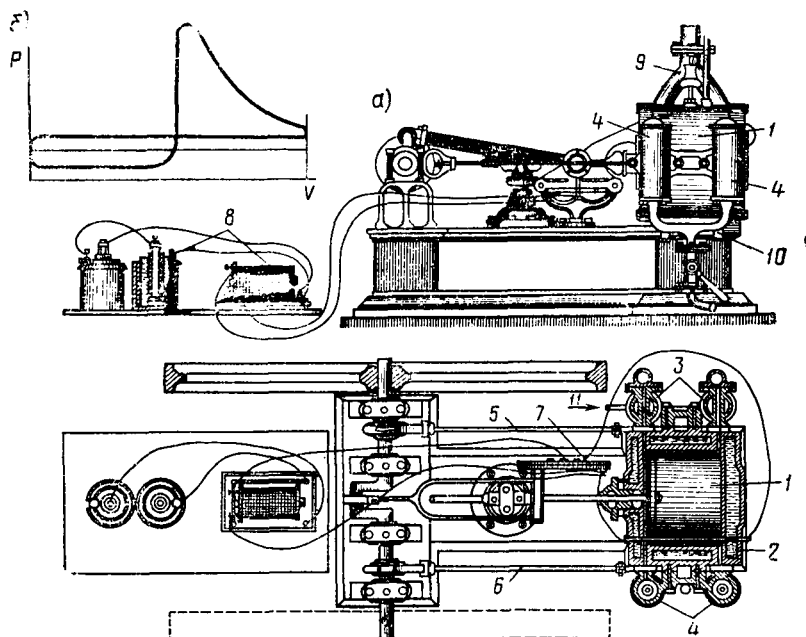


Рис. 4.17. Двигатель Ленуара и индикаторная диаграмма его работы:

1 — цилиндр; 2 — водяная рубашка; 3 — впускные золотники; 4 — выпускные золотники; 5 — тяга системы впуска; 6 — тяга системы выпуска; 7 — распределительный диск моментов зажигания; 8 — электрическая батарея с индукционной катушкой; 9 — подача газа; 10 — выхлоп; 11 — вход охлаждающей воды

новения получил сохранившееся и поныне название «двигателя внутреннего сгорания». Таким образом, развитие паровой машины подготовило конструктивные формы нового поршневого двигателя. Ускоренной разработке двигателя внутреннего сгорания способствовало и то, что к началу XIX в. была разработана технология производства газового горючего, а позднее и индукционная катушка, позволявшая зажечь горючую смесь в полости цилиндра искровым разрядом.

Все перечисленное было реализовано в конструкции, предложенной в 1860 г. французом Ж. Ленуаром (рис. 4.17, а). Испытания двигателя Ленуара показали, что его к. п. д. составил всего 3,3%, тогда как у паровых двигателей того времени этот к. п. д. достигал 8—10%. Низкая экономичность была следствием нерационального цикла, разработанного изобретателем (рис. 4.17, б). При всасывании горючей смеси светильного газа с воздухом до половины хода поршня расширение ограничивалось второй половиной хода и поэтому было всего-навсего двукратным.

Значительно уменьшить расход горючего удалось немецким изобретателям Н. Отто и Е. Лангену, которые умело использовали возможности газодвигателя, предлагавшегося в 1854 г.

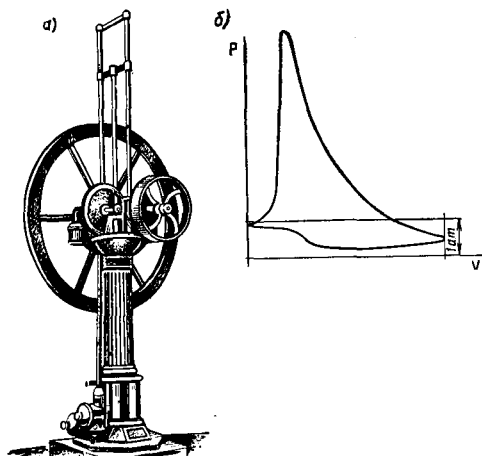


Рис. 4.18. Атмосферный двигатель Отто и Лангена (1865—1866 гг.) и индикаторная диаграмма

в крайне недоработанном виде итальянцами Барзанти и Маттеучи. Это было возрождением принципа «пороховой машины» Д. Папена с использованием вместо пороха газовой смеси. Внешний вид двигателя представлен на рис. 4.18, а. Так как всасывание рабочей смеси осуществлялось только на $\frac{1}{10}$ хода поршня (рис. 4.18, б), расширение проходило далеко в область вакуума, позволяя срабатывать больший, чем у Лемуара, теплоперепад. Десятикратное расширение позволило получить «потолок» к. п. д. для двигателей подобного типа (14 %).

Дальнейшее повышение к. п. д. могло быть достигнуто только за счет предварительного сжатия рабочей смеси. Это раньше других понял французский инженер Бо-де-Роша, опубликовавший в 1862 г. небольшую брошюру «Новейшие исследования относительно практических условий применения теплоты», в которой он описывал цикл четырехтактного (рис. 4.19) двигателя, широко распространенного в наше время. Бо-де-Роша не запатентовал своего предложения и не делал попыток его реализации. Четырехтактный двигатель был впервые построен в 1878 г. Н. Отто и Е. Лангеном. К. п. д. их двигателя достигал 22 %.

Расширение производства двигателей внутреннего сгорания вызвало их специализацию. Конструировались двигатели для привода доменных воздуховодов с использованием газов доменных печей. Двигатели начали специализироваться по областям их применения в качестве судовых, стационарных, газогенераторных, позднее — автомобильных, еще позднее — авиационных. Началось широкое использование высококалорийного жидкого топлива. Тяжелое жидкое топливо стали применять в двигателях с калоризатором («запальным шаром»), раскаливающимся докрасна и служащим для воспламенения вбрызнутого горючего. Для легких сортов

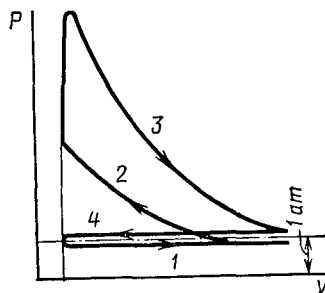


Рис. 4.19. Индикаторная диаграмма работы четырехтактного двигателя:

1 — всасывание; 2 — сжатие;
3 — расширение (рабочий ход);
4 — выхлоп продуктов сгорания

жидкого топлива стали строить карбюраторные двигатели, в которых карбюратор служил для смешивания мелко распыленного и частично испарившегося топлива с воздухом.

Один из первых наиболее удачных бензиновых двигателей был запатентован в Германии Г. Даймлером в 1885 г. для применения в автомобиле. Таким образом, сразу же определилась основная сфера использования бензинового двигателя, получившая особенное развитие уже в XX в., когда он стал применяться и в авиации.

Особая линия развития двигателей внутреннего сгорания связана с работами немецкого инженера Рудольфа Дизеля, получившего патент в 1892 г. на двигатель нового типа, общие основы которого были изложены им в небольшой брошюре «Теория и конструкция рационального теплового двигателя», вышедшей в 1893 г.

Предложение Дизеля сводилось к высокому сжатию воздуха в полости двигателя для повышения его температуры выше температуры воспламенения горючего. Будучи подано в полость двигателя в конце хода сжатия, горючее воспламеняется от нагретого воздуха и, нагнетаемое постепенно, осуществляет процесс подвода тепла без изменения температуры в соответствии с циклом Карно. Произведя тепловой расчет своего двигателя мощностью 100 л. с., он получил температуру в конце сжатия 1073 К, давление 250 ат и к. п. д., равный 73%.

После ряда неудачных конструкций Дизель в ноябре 1893 г. получил патент, который предусматривал метод регулирования мощности двигателя «путем видоизменения характера кривой процесса сгорания...», как это было показано на приложенном к патенту чертеже (рис. 4.20, а). Из чертежа видно, что стремление увеличить работу цикла привело к отходу от изотермы и постепенному приближению к изобаре (горизонтальной линии постоянного давления).

Конструирование нового двигателя продолжалось. Если первый двигатель (1894 г.) мог работать только на холостой ход, то уже двигатель 1895 г. с распыливанием керосина от компрессора и хорошим водяным охлаждением был первым опытным двигателем, способным работать с небольшой нагрузкой. Только в 1896 г. испытание нового опытного образца принесло успех.

На рис. 4.20, б изображен компрессор, приводимый в действие от шатуна двигателя через балансир, и пусковой баллон сжатого воздуха, вдувавшего керосин в рабочую полость цилиндра через игольчатый клапан, расположенный на геометрической оси цилиндра; в левой части крышки цилиндра расположен клапан для всасывания воздуха и выхлопа продуктов сгорания, приводимый в действие от кулачка, расположенного справа от двигателя на кронштейне.

После демонстрации на Парижской выставке 1900 г. двигателя Дизеля, усовершенствованного Аугсбургским заводом и получившего впоследствии название «дизель», начинается дизелестроение.

Сам Дизель до конца своей жизни (1913 г.) был вынужден защищать свои патентные права, так как горение топлива при посто-

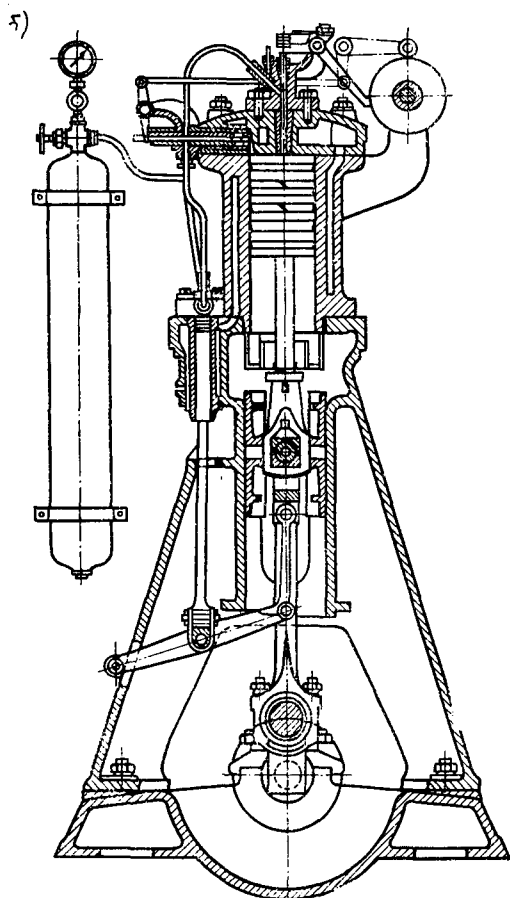
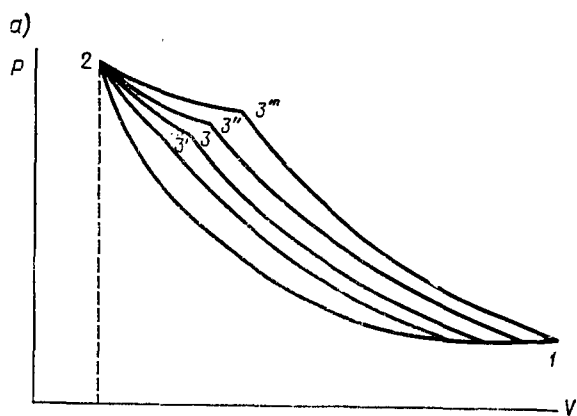


Рис. 4.20. Опытный двигатель Дизеля (1896 г.)

янном давлении (правда, без высокого сжатия), к которому он постепенно пришел, патентовалось рядом изобретателей в разных странах.

Следует отметить, что двигатель Дизеля в России внедрялся при очень благоприятных условиях, не замедливших сказаться в ряде отечественных достижений в дизелестроении. Так, в частности, керосин в качестве топлива был заменен сырой нефтью. Особенно много было сделано в области конструирования судовых дизелей. Первым дизельным судном в мире явился нефтевоз «Вандал» (1903 г.). Так как двигатель не имел устройства для реверса, то установка предусматривала электрическую

передачу энергии на гребной вал судна для получения заднего хода; передний ход достигался непосредственным соединением вала двигателя с валом винта. В 1904 г. был спущен на воду второй, улучшенный экземпляр судна под названием «Сармат» с двумя двигателями по 180 л. с., развивавшими скорость 240 об/мин.

Стремление избежать сложной электропередачи стимулировало поиск путей непосредственного реверсирования двигателя, которое было успешно применено к двигателю подводной лодки «Минога» в 1908 г. Опыты проф. Н. А. Быкова показали, что двигатель легко реверсировался за 10—12 с. Первое буксирное судно с двигателями Дизеля — «Мысль» (1907 г.) — получило быстро привившееся в технической терминологии наименование «теплоход».

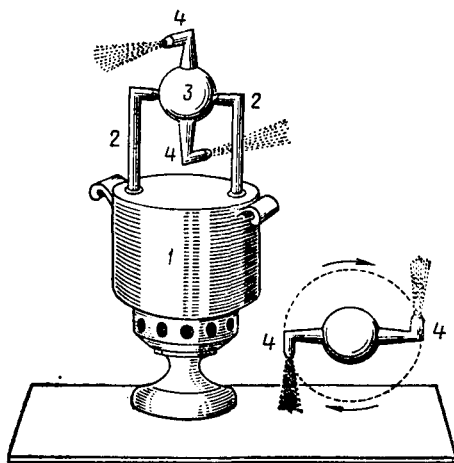


Рис. 4.21. Эолипил Герона:

1 — сосуд для парообразования; 2 — паропроводящие трубки; 3 — шар; 4 — выпускные трубки

ПЕРВЫЕ ОПЫТЫ ПО СОЗДАНИЮ ПАРОВЫХ ТУРБИН. ГАЗОВАЯ ТУРБИНА

Создание паровой турбины стимулировалось в промышленности начавшимся применением рабочих машин, обладающих высокой скоростью вращения, — дисковых пил, центрифуг, вентиляторов, центробежных насосов, сепараторов, наконец, электрических генераторов.

Описание принципа действия паровой турбины можно найти в глубокой древности. Еще до наступления нашей эры Герон Александрийский сконструировал прибор, названный им «эолипил» (рис. 4.21). Под действием реакции струи пара шар вращался вокруг горизонтальной оси. Уже в этой модели можно увидеть идею реактивной турбины. В XVII в. итальянец Дж. Бранка предлагал

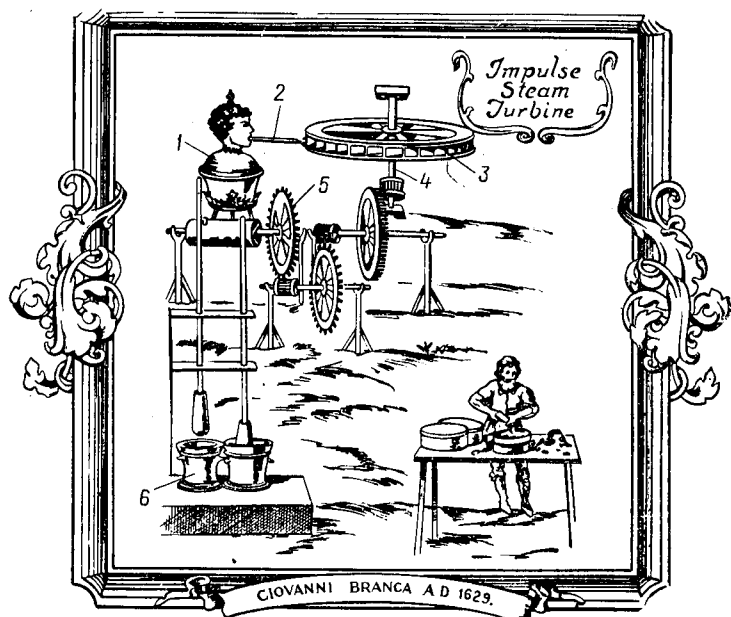


Рис. 4.22. Паровая турбина Д. Бранка (из книги Д. Бранка «Le macchine») (1629 г.):

1 — паровой котел; 2 — длинная трубка (сопло); 3 — колесо машины; 4 — вал колеса; 5 — система зубчатых передач; 6 — толчийный станок

активную паровую турбину (рис. 4.22) для привода медленно действующих пестов. Опыты Сен-Венана и Вантцеля над истечением пара указали на большие трудности при разработке паровой турбины, вызванные высокой скоростью пара.

Известное в ходе эксплуатации гидравлических турбин рациональное отношение между скоростями движущей среды и воспринимающей работу лопатки показывало, что паровая турбина будет эффективно работать лишь при очень больших числах оборотов.

Таким образом, наметились два направления разработки: изыскание способов снижения скорости паровых турбин без потери к. п. д. и разработка конструкций, способных работать с большим числом оборотов (несколько тысяч оборотов в минуту).

Первое направление (Леруа, 1840 г.) развивалось по пути применения многоступенчатой турбины. Более отчетливо принцип многоступенчатых турбин в качестве метода снижения скорости был высказан в записке Турнера, рассмотренной в 1853 г. на заседании Парижской академии наук. Позднее этот же принцип предлагался рядом других изобретателей.

Все увеличивавшееся количество различных конструкций паровых турбин, разработанных в течение второй половины XIX в., свидетельствовало о возникновении и постепенном обострении противоречия между тихоходной паровой машиной и растущим парком

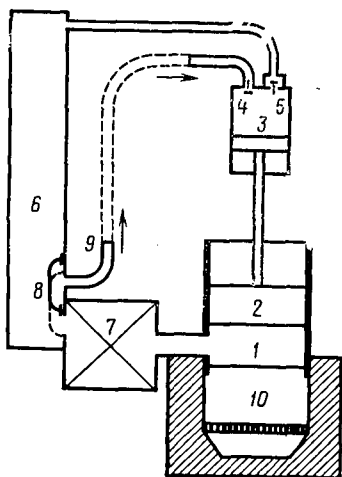


Рис. 4.23. Схема «калорической» машины Эриксона:

1 — рабочий цилиндр; 2 — поршень; 3 — компрессор; 4 — всасывающий клапан; 5 — нагнетательный клапан; 6 — промежуточный резервуар; 7 — теплообменник; 8 — переключной золотник; 9 — выпускная труба; 10 — топка

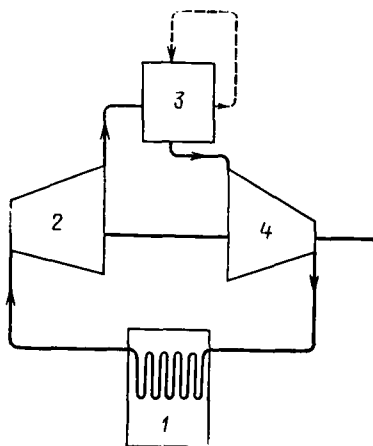


Рис. 4.24. Схема современной газотурбинной установки с замкнутым циклом:

1 — котел-нагреватель; 2 — газовая турбина; 3 — теплообменник; 4 — осевой компрессор

быстроходных рабочих машин. Налицо был социальный заказ на новый двигатель. Однако до 80—90-х годов XIX в. применение паровых турбин носило единственный характер. В 30-х годах в г. Сиракузах (США) было построено несколько турбин для привода центробежных пил. Турбины представляли собой модификацию «эолипила» Герона. Громадный удельный расход пара в них компенсировался использованием в качестве горючего отходов лесопильного производства.

Помимо дороговизны и сложности в эксплуатации, котлы первой половины XIX в. имели еще один существенный недостаток: они были взрывоопасны. Частые взрывы нередко сопровождались человеческими жертвами.

Стремление избавиться от котла направило поиски изобретателей на использование воздуха в качестве рабочего тела теплосиловых установок, получивших название «калорических». Примером калорической установки может служить теплосиловая установка шведского инженера Д. Эриксона (рис. 4.23) (середина XIX в.), состоявшая из двух калорических двигателей (работала на одном из заводов в Нью-Йорке). Калорическими двигателями было оборудовано морское судно «Эриксон», а в несколько упрощенной конструкции подобный двигатель использовался на заводе Нобеля в Петербурге.

Рабочим телом в калорическом двигателе (рис. 4.23) служил воздух, нагреваемый в цилиндре двигателя 1 от расположенной под

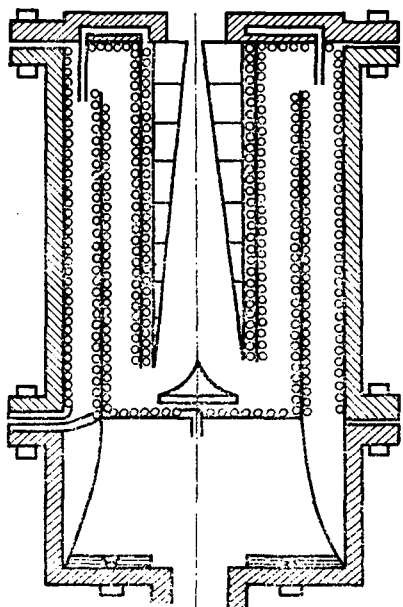


Рис. 4.25. Газопарород (камера сгорания турбины) П. Д. Кузьминского

цилиндром топки 10. Сжатый воздух через нагнетательный клапан 5 подавался в промежуточный резервуар 6 и далее при открытом перепускным золотником отверстия 8 поступал в рабочий цилиндр 1, пройдя предварительно теплообменник 7, называвшийся тогда «реженератор» (сейчас — регенератор). Регенератор заполнялся мелкой медной сеткой. Воздух, проходя через ячейки сетки, нагретые в течение предыдущего хода двигателя, нагревался перед поступлением в цилиндр. Обратный ход осуществлялся за счет энергии, аккумулированной в поднятом тяжелом поршне, который, опускаясь, отдавал работу движителю судна и выталкивал горячий воздух из цилиндра. Отработавший воздух сначала нагревал насадку регенератора, а затем выходил в выхлопную трубу 9 под золотником, находящимся уже в другом положении

Одновременно опускающийся поршень всасывал воздух в полость компрессора 3 через приемную трубу и всасывающий клапан 4. Схемой предусматривалась возможность замкнутого цикла при соединении выхлопной трубы с приемной трубой, как показано пунктиром на рис. 4.23.

Воздушный котел и газовая турбина современного двигателя соответствуют по выполняемым ими функциям цилиндру калорического двигателя с расположенной под ним топкой. В современной газовой турбине используются и теплообменник, и компрессор. Схема газотурбинной установки может быть замкнутой (рис. 4.24). Несмотря на тождество принципиальных схем, вытекающее из тождества принятых циклов, между калорическими двигателями и современными газовыми турбинами лежит длительный путь исторического развития, разработки эффективных циклов газового двигателя, исследования и обобщения условий теплообмена, осуществления перехода от поршневых конструкций к роторным (т. е. от десятков к тысячам оборотов в минуту), освоения технологии получения жаростойких сталей, достижения высокого к. п. д. турбокомпрессоров. Исследования установки судна «Эриксон», опубликованные в 1852 г., показали, что к. п. д. двигателей не превосходил к. п. д. средних паровых машин, а сам двигатель был крайне громоздким (при мощности 170 л. с. диаметр цилиндров

достигал 4,2 м.). К. п. д. современных газовых турбин приближается к 50%.

Первая попытка реализации газовой турбины была сделана инженером-механиком русского флота П. Д. Кузьминским, спроектировавшим и построившим в 1897 г. небольшую радиальную газопаровую турбину с постоянным давлением сгорания. Камера сгорания турбины Кузьминского (рис. 4.25), которую он наименовал «газопарород», охлаждалась спиральными змеевиками, по которым проводилась вода, нагревавшаяся к моменту поступления в камеру до состояния, близкого к испарению. В конической полости камеры сгорания горящая нефть, подаваемая нефтяной форсункой, создавала факел. Смесь из продуктов сгорания нефти и водяного пара по цилиндрическим каналам поступала в верхнюю часть «газопаророда», откуда она при давлении 10 ат, поддерживаемом работой компрессора, поступала на лопатки газовой турбины. Смерть изобретателя в 1900 г. не позволила ему привести свое изобретение к законченному виду и преодолеть трудности, среди которых основной было отсутствие жароупорных сплавов.

В круг работ подготовительного периода входили: разработка и анализ наивыгоднейших циклов газовых турбин, экспериментальное исследование свойств рабочих тел в достаточно широком диапазоне температур и давлений, повышение к. п. д. компрессорных установок и освоение технологии производства жароупорных сталей. Только начиная с 30-х годов XX в. появилась реальная возможность сооружения экономичных газовых турбин.

Что касается теоретических проблем, то до конца XIX в. развитие теплотехники характеризуется значительными успехами в разработке теоретических основ и в исследовании свойств водяного пара и газов. Среди обобщающих теоретических работ следует отметить труды французских ученых Ж. Б. Фурье («Аналитическая теория тепла», 1822 г.) и С. Карно («Размышление о движущей силе огня», 1824 г.).

ГЛАВА 5

ЗАРОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. СТАНОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

Электрические и магнитные явления наблюдались еще в глубокой древности. История электротехники насчитывает немногим более полутора столетий. Свое начало она ведет с момента создания первого электрохимического генератора (1800 г.). До 1800 г. были сделаны только первые шаги по созданию простейших электростатических машин и приборов и установлению некоторых закономерностей в области статического электричества и магнетизма. В этот период происходит становление электростатики.

С 1800 по 1830 г. происходило изучение действий электрического тока, был установлен ряд закономерностей в области электромагнетизма, а также проведены первые опыты по практическому применению электричества. В это время разрабатываются основы электродинамики, закладывается фундамент электротехники.

Второй этап развития электротехники (1831—1870 гг.) начался с открытия электромагнитной индукции, а завершился созданием первого промышленного электрического генератора. Третий этап в развитии электротехники (1870—1891 гг.) — с момента внедрения в промышленность электромашиного генератора постоянного тока вплоть до завершения исследований в области многофазных систем. Это период интенсивного развития электротехники в условиях децентрализованного производства электроэнергии и начального развития электростанций. В это время начинается становление электротехники как самостоятельной отрасли.

Решение проблемы передачи электроэнергии на расстояние, разработка промышленных типов трансформатора и асинхронного двигателя создали предпосылки для широкого развития электрификации. С этого времени начинается четвертый этап в развитии электротехники, продолжающийся до настоящего времени.

Остановимся кратко на важнейших открытиях, способствовавших становлению электростатики.

Первые наблюдения электрических и магнитных явлений относятся к VII—VI вв. до нашей эры. В течение многих веков представления о сущности этих явлений были весьма примитивными. Несмотря на это, магнит нашел практическое применение еще до нашей эры в странах древнейшей культуры — Китае и Индии (рис. 5.1).

Первое научное сочинение о магнитных и электрических явлениях принадлежит английскому ученому У. Гильберту, опубликовавшему в 1600 г. трактат

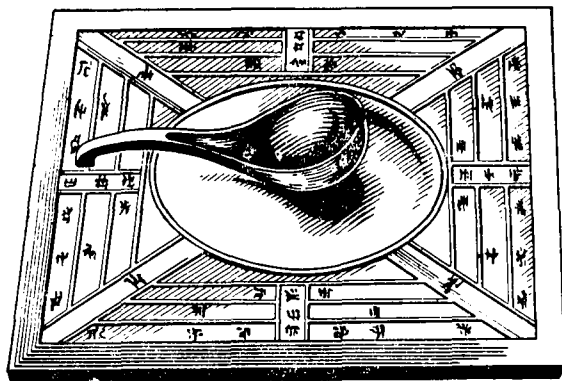


Рис. 5.1. Китайский компас

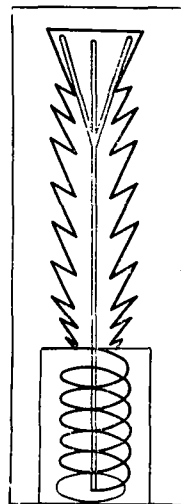


Рис. 5.2. Прибор Ломоносова для определения интенсивности электрических атмосферных разрядов

«О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле». Гильберт ввел в науку термин «электричество», назвав «электрическими» тела, способные электризоваться. Дальнейшее изучение электрических явлений привело к созданию разнообразных электрических машин и приборов. Были разработаны первая электростатическая машина (1650 г.), лейденская банка (конденсатор) (1745 г.), электроизмерительный прибор Ломоносова (рис. 5.2) (получив одноименный заряд, витки пружины стремятся оттолкнуться, увлекая за собой пластинку с укрепленным на ней стержнем. Степень опускания стержня фиксировалась с помощью «усов»), электрический указатель Г. В. Рихмана — первый прибор непосредственной оценки (1745 г.) (рис. 5.3) — и крутильные весы Ш. О. Кулона* (рис. 5.4) — один из наиболее точных приборов своего времени, позволивший Кулону в 1785 г. установить закон взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов.

Создание первых электроизмерительных приборов положило начало установлению количественных закономерностей в области электромагнитных явлений. Большое значение имели работы, установившие электрическую природу грозовых явлений в атмосфере, а также разработка теорий электричества (М. В. Ломоносов, Б. Франклин) и создание разнообразных молниеотводов (М. В. Ломоносов, Б. Франклин и чешский ученый П. Дивиш).

Для практики наиболее удачными оказались опыты по использованию электричества в медицинских целях. В многочисленных трудах конца XVIII — начала XIX вв. описывались разнообразные электростатические машины и приборы, предназначенные для электролечения. Эти работы немало способствовали расширению знаний в области электричества, установлению влияния электрических разрядов на организм животных и человека, выявлению электроизоляционных свойств стекла, сургуча, смолы, хлопчатобумажных тканей, шелка.

Представляют большой интерес труды русского ученого А. Т. Болотова. Им была создана своеобразная электролечебница, в которой устанавливались простые и «особливо маленькие, складные дорожные» электростатические машины, про-

* Крутильные весы были изобретены механиками ранее. Кулон же впервые их использовал для электрических и магнитных измерений.

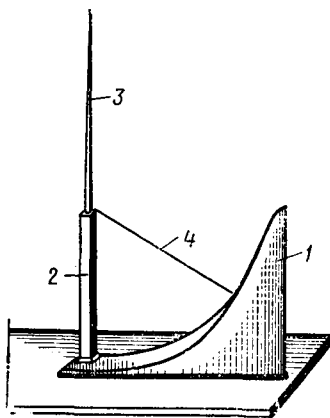


Рис. 5.3. Электрический указатель Рихмана:

1 — деревянный квадрант с делениями; 2 — металлическая линейка, соединявшаяся с металлическим шестом 3, установленном на на крыше дома; 4 — льняная нить, отклонявшаяся от наэлектризованной линейки

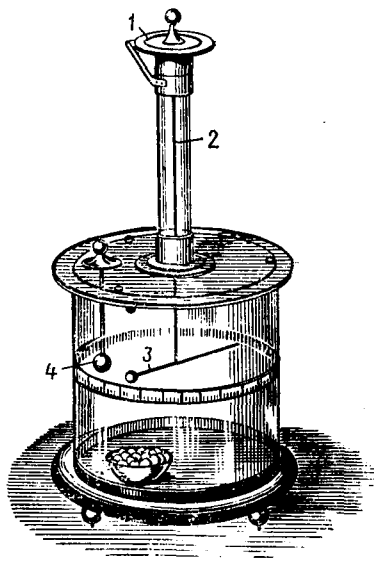


Рис. 5.4. Крутильные весы Кулона:

1 — микрометрический круг с указателем и клеммой для подвешивания нити 2, на которой висит стрелка 3 с бузиновым шариком; 4 — заряжаемый неподвижный бузиновый шарик, взаимодействующий с подвижным шариком стрелки 3; сила взаимодействия определялась по углу кручения нити

изводившие, однако, «изрядное действие». Свой опыт он обобщил в книге «Краткие и на опытности основанные замечания об электрицизме и о способности электрических машин к помоганию от разных болезней», изданной в Петербурге в 1803 г.

ПЕРВЫЙ ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ОТКРЫТИЕ ХИМИЧЕСКИХ, ТЕПЛОВЫХ, СВЕТОВЫХ И МАГНИТНЫХ ДЕЙСТВИЙ ТОКА

Промышленный переворот значительно стимулировал исследования электрических и магнитных явлений. В 1799 г. итальянским ученым А. Вольта * был создан первый электрохимический генератор — вольтов столб.

Изучая опыты итальянского анатома Л. Гальвани, обнаружившего сокращение мышц препарированной лягушки при соприкосновении их с двумя разнородными металлами, Вольта не согласился с тем, что это явление вызвано особым, присущим живому организму «животным» электричеством. Он утверждал, что лягушка в опытах Гальвани «есть чувствительнейший электромметр», а источник

* Первое сообщение Вольта было сделано в начале 1800 г.

электричества — контакт двух разнородных металлов. Эти соображения Вольта положил в основу своей теории «контактного электричества». Однако многочисленные эксперименты показали, что простого контакта металлов недостаточно для получения сколько-нибудь заметного тока; выяснилось, что непрерывный электрический ток может возникнуть лишь в замкнутой цепи, составленной из различных проводников: металлов (которые он называл проводниками первого класса) и жидкостей (названных им проводниками второго класса).

Вольтов столб представлял собой простейшую батарею гальванических элементов с одной жидкостью: между парами цинковых и медных пластин (дисков) прокладывались суконные кружки, смоченные щелочью или кислотой (рис. 5.5).

По мнению Вольта, при соприкосновении двух различных металлов возникает «электро-возбудительная» или «электродвижущая» сила, под действием которой электричество одного знака сосредоточивается на одном из металлов, а электричество противоположного знака — на другом. Чтобы действие отдельных пар суммировалось, необходимо обеспечить соприкосновение каждой цинковой пластины только с одной медной, т. е. исключить встречный металлический контакт. Это осуществляется с помощью проводников второго класса (влажных суконных кружков); такие кружки разделяют пары металлов и в то же время не препятствуют движению электричества. Таким образом, Вольта, не поняв действительной причины возникновения тока, практически пришел к созданию гальванического элемента, действие которого основывалось именно на превращении химической энергии в электрическую.

Создание первого источника электрического тока сыграло громадную роль в развитии науки об электричестве и магнетизме. Ф. Энгельс указывал, что «открытие гальванического тока... имеет для учения об электричестве по меньшей мере такое же значение, как открытие кислорода для химии» *. Современник Вольта французский ученый Ф. Д. Араго считал вольтов столб «самым замечательным прибором, когда-либо изобретенным людьми, не исключая телескопа и паровой машины».

В течение двух-трех лет после создания вольтова столба рядом ученых было разработано несколько различных модификаций батарей гальванических элементов. Среди них заслуживает внимания «огромная наипаче» гальваническая батарея русского академика

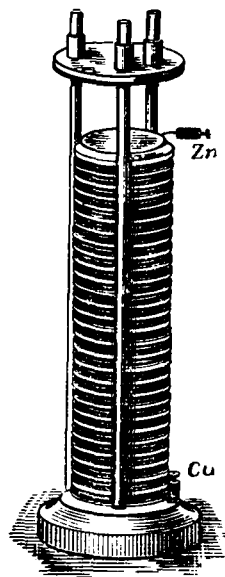


Рис. 5.5. Вольтов столб

* Ф. Энгельс. Диалектика природы. 1975, стр. 92.

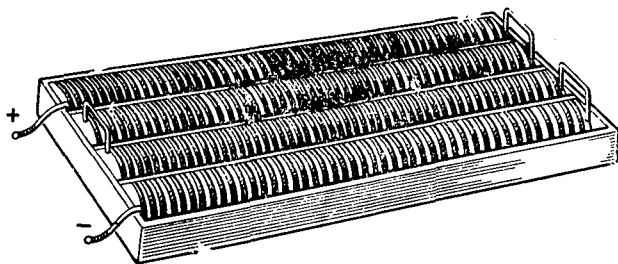


Рис. 5.6. Примерное расположение и соединение элементов в батарее Петрова

В. В. Петрова, описанная в его труде «Известие о гальвани-вольтовых опытах» (СПб., 1803 г.). Изучив работы своих предшественников, Петров пришел к выводу, что более полное и всестороннее исследование электрического тока возможно лишь с помощью крупных гальванических батарей, действие которых будет более интенсивным и легче наблюдаемым.

В то время как гальванические батареи за рубежом состояли из нескольких десятков или сотен пластин, Петров построил батарею из 4200 медных и цинковых пластин, или 2100 медно-цинковых элементов, соединенных последовательно. Батарея (рис. 5.6) располагалась в большом деревянном ящике, разделенном по длине на четыре отделения, соединенные между собой металлическими дужками; для изоляции пластин стенки ящика и разделяющие перегородки покрывались сургучным лаком. Общая длина батареи составила 12 м. Это был уникальный для своего времени источник электрического тока. Как показали современные эксперименты с моделью батареи Петрова, э. д. с. ее составляла около 1700 В, а максимальная полезная мощность — $60 \div 85$ Вт. Именно благодаря применению источника э. д. с. высокого напряжения Петрову в 1802 г. впервые удалось наблюдать явление электрической дуги. Точно так же английский ученый Х. Дэви смог наблюдать электрическую дугу только после того, как в 1808 г. он построил большую гальваническую батарею, состоявшую из 2000 элементов.

Эксперименты с вольтовым столбом уже в течение первых двух-трех лет после его создания привели к открытию химических, тепловых, световых и магнитных действий электрического тока. В 1800 г. впервые был осуществлен (англичанами А. Карлisleм и У. Никольсоном) электролиз воды, а затем и других жидкостей. В процессе электрохимических исследований удалось выявить электропроводность и физико-химические свойства различных веществ. Так, В. В. Петров описывает опыты по электролизу растительных масел, в результате которых им были обнаружены высокие электроизоляционные свойства этих масел. Как известно, масла позднее получили широкое применение в качестве электроизоляционного материала. Он также установил, что сера и фосфор являются «худыми» проводниками электричества. Желая продемонстрировать

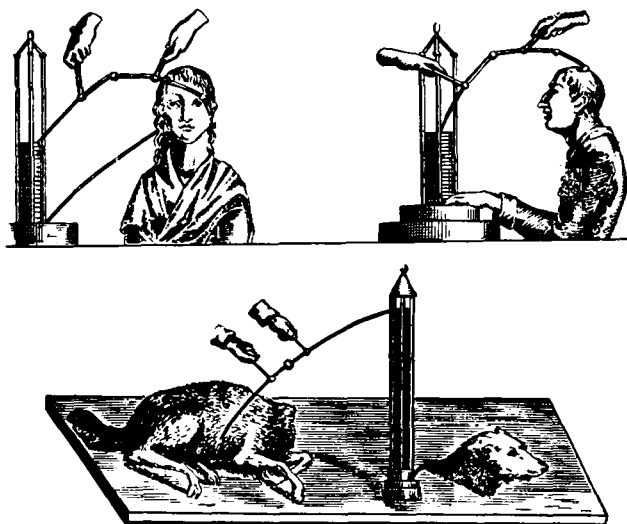


Рис. 5.7. Опыты по электролечению и изучению действия электрического тока на организмы человека и животных (из книги итальянского физика Д. Альдини «Теоретическое и экспериментальное исследование гальванизма», Париж, 1804 г.)

явление электролиза одновременно в нескольких трубках с водой, Петров впервые применил параллельное соединение приемников тока.

Большое значение для расширения практических применений электричества сыграло открытие в 1807 г. Х. Дэви электролитического способа получения щелочных металлов — калия и натрия, ранее неизвестных в чистом виде; в 1808 г. Дэви таким же путем получил магний, барий, стронций, кальций.

В 1807 г. профессором Московского университета Ф. Ф. Рейсом было открыто еще одно действие тока — электроосмос, получивший в наше время практическое применение (электродренаж). Эти работы продемонстрировали практическую ценность электрохимических действий тока. Следующим этапом явилась разработка теории электролиза, были открыты законы электролиза (Фарадей, 1833—1834 гг.). Терминология, предложенная Фарадеем (электрод, анод, катод), сохранилась до настоящего времени.

Дальнейшее развитие получило применение электрического тока для медицинских целей (рис. 5.7).

Наиболее эффективным проявлением тепловых и световых действий тока была электрическая дуга. В труде В. В. Петрова «Известие о гальвани-вольтовых опытах» впервые указывается на возможность применения электрической дуги для освещения, плавки металлов и восстановления металлов из их окислов.

Существенное значение для установления взаимосвязей между различными явлениями природы и, в частности, для открытия закона сохранения и превращения энергии имело открытие явления термоэлектричества (1821 г., Т. Зеебек), сущность которого заключается в том, что при подогревании или охлаждении одного из спаев двух разнородных металлических пластинок возникает электрический ток в контуре, образованном этими пластинками. Вскоре немецкий физик А. С. Беккерель установил, что термоэлектричество возникает не только при употреблении разнородных металлов, но и при различии в структуре и плотности проводника по обеим сторонам от нагреваемого места.

В течение длительного времени термоэлементы вследствие их крайней неэкономичности применялись лишь для измерения температур (термопары). Только в наши дни достижения полупроводниковой техники позволили разработать более экономичные термоэлементы.

В 1834 г. Ж. Ш. Пельтье была установлена обратимость термоэлектрических процессов: при прохождении электрического тока через спай двух различных металлов выделяется или поглощается тепло в зависимости от направления тока. Успехи в области техники электрических измерений позволили в начале 40-х годов установить количественные характеристики теплового действия тока — закон Джоуля — Ленца, открытый в 1841—1842 гг. независимо друг от друга английским и русским учеными. Открытый ими закон представляет собой частный случай закона сохранения и превращения энергии.

Особенно важным для развития электротехники оказалось открытие магнитных действий тока. На существование связи между электричеством и магнетизмом указывали опыты, проводимые еще в XVIII в., в частности установление намагничивающего действия молнии. Расширение и углубление исследований электрического тока создали предпосылки для новых открытий. Так, в 1820 г. была опубликована брошюра датского физика Г. Х. Эрстеда, в которой описывались наблюдавшиеся им отклонения магнитной стрелки под действием электрического тока. В том же году было обнаружено (Ф. Д. Араго) явление намагничивания проводника током, а также усиление эффекта намагничивания при замене прямолинейного проводника проволоочной спиралью — соленоидом.

Новым важным шагом на пути от качественных наблюдений над магнитными действиями электрического тока к определению количественных закономерностей явилось открытие в 1820 г. французскими учеными Ж. Б. Био и Ф. Саваром закона действия тока на магнит. Новый закон, уточненный позднее французским ученым П. Лапласом, вскрывал характер взаимодействия между двумя материальными телами, определяя «равнодействующую всех сил, исходящих из провода», как вектор, направленный нормально к плоскости, в которой находится проводник с током. Установленная

закономерность позволила объяснить вращательный характер движения проводника относительно магнита или магнита относительно проводника.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Крупным научным событием рассматриваемого периода явились разработка основ электродинамики и установление электрической природы магнетизма А. Ампером. Основываясь на том, что катушка или кольцевой проводник с током аналогичны магниту, Ампер пришел к выводу об идентичности взаимодействия кольцевых проводников и взаимодействия магнитов. Эксперименты подтвердили выводы Ампера. От кольцевых токов Ампер перешел к линейным и показал, что в зависимости от направления токов*, протекающих в двух проводниках, эти проводники будут или притягиваться друг к другу, или отталкиваться. Обнаруженные явления были названы Ампером «электродинамическими» в отличие от электростатических. Ампер вывел уравнение, характеризующее силу взаимодействия двух токов, подобно тому как это сделал Кулон в отношении взаимодействия электрических зарядов. Электродинамическая теория Ампера изложена в сочинении «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта», изданном в Париже в 1826—1827 гг.

На основании своих исследований, а также трудов предшественников Ампер пришел к принципиально новому выводу о причине явлений магнетизма. Он отрицал существование обеих магнитных жидкостей и утверждал, что магнитное поле имеет электрическое происхождение. Основываясь на тождестве действий круговых токов и магнитов, Ампер считал, что магнетизм какой-либо частицы обусловлен наличием круговых токов в этой частице, а свойства магнита в целом обусловлены электрическими токами, расположенными в плоскостях, нормальных к его оси. Гипотеза Ампера о молекулярных круговых токах явилась новым прогрессивным шагом на пути к материалистической трактовке природы магнитных явлений.

В рассматриваемый период наметился переход от качественных наблюдений явлений к установлению количественных соотношений и основных закономерностей в электрической цепи.

Впервые связь между током и сечением проводника была отмечена в 1802 г. В. В. Петровым, установившим, что при увеличении площади поперечного сечения проводника ток в цепи возрастает. В 1821 г. Дэви показал, что проводимость зависит от материала и температуры проводника; он также отметил зависимость

* Термин «электрический ток» и понятие о направлении тока были введены Ампером. Он предложил считать положительным направление тока, текущего от положительного полюса источника к отрицательному.

проводимости от площади сечения проводника. Более глубоко эти явления исследовались немецким физиком Г. С. Омом.

Помещая магнитную стрелку, подвешенную на нити, около проводника с током, Ом показал, что угол кручения нити, характеризующий отклоняющее действие тока, остается постоянным по всей длине проводника. На основании этих опытов Ом пришел к выводу, что ток в различных участках неразветвленной цепи неизменен. Исследуя электрическую цепь, Ом впервые проводит аналогии между движением электричества и тепловым или водяным потоками; при этом разность потенциалов играет роль падения температур или разностей уровней. Основываясь на указанной аналогии, он осуществляет ряд экспериментов и устанавливает известный закон электрической цепи, носящий его имя. Результаты исследований Ома были опубликованы в 1827 г. в работе «Гальваническая цепь, разработанная математически доктором Г. С. Омом». Спустя два десятилетия, в 1847 г., немецким физиком Г. Р. Кирхгофом были сформулированы два закона для разветвленных электрических цепей (законы Кирхгофа).

Начало нового этапа в развитии электротехники относится к 1831 г. и связано с открытием явления электромагнитной индукции, ставшего истоком последующих важнейших достижений в области электротехники. Это выдающееся открытие, так же как и другие, ему подобные, было исторически обусловлено развитием производства и успехами науки об электричестве и магнетизме.

К концу первой четверти XIX в. взаимосвязь между различными явлениями природы и взаимопревращения различных форм движения материи были уже доказаны: установлена связь тепловой и механической, электрической и тепловой, электрической и химической форм энергии. Изучение явлений электромагнетизма также убедительно указывало на связь между электричеством и магнетизмом. Если электрический ток вызывал магнитные действия, то естественно было предположить, что и магнитные явления могут вызывать появление электрического тока. Такое предположение впервые высказал М. Фарадей, который был убежден в возможности взаимных превращений «сил» природы. В 1821 г. он записал в своем дневнике: «Превратить магнетизм в электричество». В результате упорных исследований Фарадей в 1831 г. показал возможность «превращения магнетизма в электричество», открыв явление электромагнитной индукции. Полгода спустя это же явление наблюдалось независимо от Фарадея американским физиком Д. Генри.

Первая серия опытов Фарадея закончилась экспериментом, демонстрировавшим явление «вольта-электрической» (по терминологии Фарадея) индукции (рис. 5.8 а — г). Обнаружив возникновение тока во вторичной цепи 2 при замыкании или размыкании первичной 1, Фарадей поставил эксперимент для выяснения свойств индуктированного тока: внутрь спирали 6, включенной во вторичную цепь, помещалась стальная игла 8 (рис. 5.8, б), которая намагничивалась индуктированным током. Результат говорил о том, что индуктированный ток подобен току, получаемому непосредственно от гальванической батареи 3.

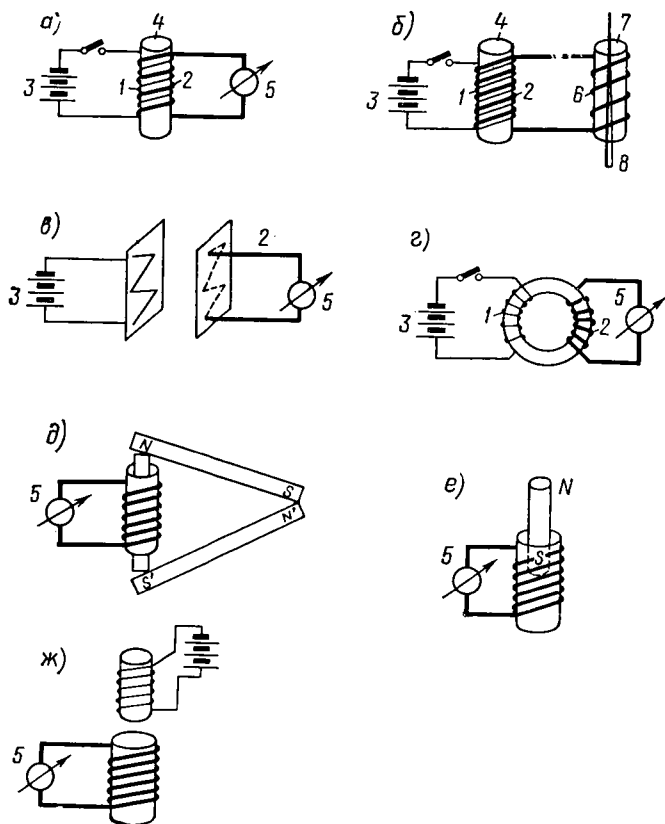


Рис. 5.8. Схема основных опытов Фарадея, приведших к открытию явления электромагнитной индукции (по рисункам Фарадея)

Заменяя деревянный или картонный барабан 4, 7, на который наматывались первичная и вторичная обмотки стальным кольцом (рис. 5.8, г), Фарадей обнаружил более интенсивное отклонение стрелки гальванометра 5. Данный опыт указывал на существенную роль среды в электромагнитных процессах. Следует отметить, что здесь Фарадей впервые применяет устройство, которое можно назвать прототипом трансформатора.

Вторая серия опытов иллюстрировала явление электромагнитной индукции, возникавшее при отсутствии источника э. д. с. в первичной цепи. Исходя из того, что катушка, обтекаемая током, идентична магниту, Фарадей заменил источник э. д. с. двумя постоянными магнитами (рис. 5.8, д) и наблюдал наличие тока во вторичной обмотке при замыкании и размыкании магнитной цепи. Это явление он назвал «магнитоэлектрической индукцией»; позднее им было отмечено, что никакой принципиальной разницы между «вольта-электрической» и «магнито-электрической» индукцией нет. Впоследствии оба эти явления были объединены термином «электромагнитная индукция». Один из заключительных экспериментов (рис. 5.8, е, ж) демонстрировал появление индуктированного тока при движении постоянного магнита или катушки с током внутри соленоида. Именно этот опыт нагляднее других продемонстрировал возможность превращения «магнетизма в электричество» или, точнее выражаясь, механической энергии в электрическую.

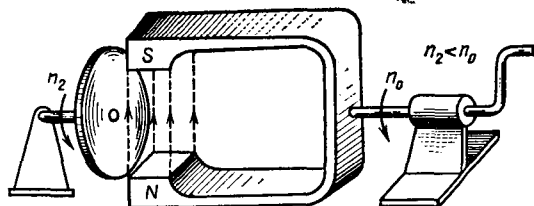


Рис. 5.9. Асинхронный механизм, принцип действия которого основан на «явлении Араго»

Опыты Фарадея показали, что электромагнитная индукция возникает как в неподвижном проводнике, находящемся в переменном магнитном поле, так и в проводнике, который перемещается в неизменном магнитном поле. Фарадей

первым ввел представление о магнитных силовых линиях, совокупность которых составляет магнитное поле как физическую реальность. Им было доказано, что наведение тока имеет место только при движении проводника поперек магнитных силовых линий. Отсюда вытекала возможность генерирования электрического тока при перемещении замкнутого проводника в поле магнита.

Фарадей установил и количественные соотношения между индукционными токами и силовыми линиями, подчеркнув, что сила тока пропорциональна скорости движения проводника и количеству пересеченных силовых линий.

Основываясь на своих результатах, Фарадей впервые дал правильное научное объяснение явлению, известному под названием «явления Араго» или «магнетизма вращения». Это явление, обнаруженное в 1824 г. Ф. Д. Араго, заключалось в том, что при вращении медного диска, находящегося над магнитной стрелкой (или под ней), стрелка также приходила во вращение. Ни Араго, ни другие ученые, повторявшие этот эксперимент, не могли его правильно объяснить. Большинство считало, что это явление вызывается наведением в диске магнетизма, при этом предполагали, что полюс магнита в ближайшей к себе части пластины вызывает магнетизм противоположного знака, а в остальных местах — рассеянную полярность одноименного знака. Вместе с тем многие ученые, в том числе и сам Араго, подчеркивали, что в случае, когда магнит и диск находятся в покое, никаких явлений притяжения между ними не замечается, тогда как предполагаемый наведенный магнетизм в диске должен был бы некоторое время сохраняться.

Открытие электромагнитной индукции позволило объяснить причину вращения диска в поле магнита. Фарадей, анализируя явление Араго, показал, что при вращении диска в магнитном поле в нем наводятся токи, которые и взаимодействуют с магнитом. Поскольку индукция имеет место только при взаимных перемещениях проводников и магнитов, то в состоянии покоя никакого взаимодействия между диском и магнитом быть не может.

Фарадей указал на возможность создания нового источника электричества на основе опыта Араго. В результате многочисленных опытов Фарадей построил первый электромашинный генератор, так называемый «диск Фарадея», при помощи которого можно было получить электрический ток (рис. 5.10). В генераторе медный диск

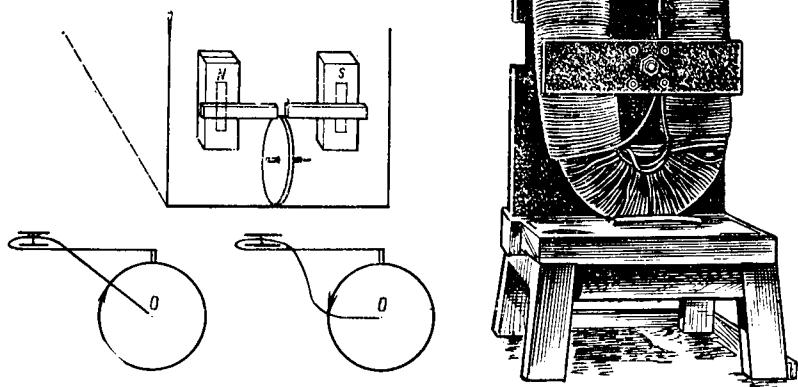


Рис. 5.10. Схема униполярного генератора (по рисунку Фарадея):
справа — большой электромагнит Королевского института, который использовал
Фарадей

располагался между полюсами N и S постоянного магнита так, чтобы магнитные линии проходили через диск перпендикулярно его плоскости. При вращении диска в магнитном поле в нем наводился электрический ток. Если на периферии диска и в его центральной части поместить скользящие контакты щеток — токоприемники, — то между ними при вращении диска возникает разность потенциалов, которая при замыкании цепи фиксируется гальванометром, включенным между щетками. При перемене направления вращения диска направление тока также изменяется. Это устройство представляет собой униполярную машину и является простейшим генератором постоянного тока.

Дальнейшие исследования электромагнитной индукции привели к установлению закона о направлении индуктированного тока. Этот закон был сформулирован в 1832 г. Э. Х. Ленцем. Ряд ученых, в том числе и Фарадей, делали попытки определить направление индуктированного тока в каждом отдельном случае; однако для некоторых взаимных положений движущихся проводников так и не удалось установить направление наведенного тока.

Закон Ленца был сформулирован следующим образом: «Если металлический проводник движется поблизости от гальванического тока или магнита, то в нем возбуждается гальванический ток такого направления, что если бы данный проводник был неподвижным, то ток мог бы обусловить его перемещение в противоположную сторону; при этом предполагается, что покоящийся проводник может перемещаться только в направлении движения или в противоположном направлении».

Закон Ленца прежде всего давал возможность предсказывать направление наведенного тока; кроме того, он позволил Ленцу сформулировать важный для электротехники принцип — обратимость генераторного и двигательного режимов электрической машины. В 1838 г. Ленц практически осуществил обратимость электрической машины постоянного тока, заставив ее работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Открытие закона о направлении индуктированного тока явилось одной из предпосылок к открытию закона сохранения и превращения энергии.

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Важнейшими научными предпосылками электромеханики послужили достижения в области электродинамики и открытие закона электромагнитной индукции. Свою положительную роль при разработке первых конструкций электрических машин и электромагнитных устройств сыграл и опыт конструирования машин и механизмов, в частности паровых двигателей.

Первоначально развитие электрических генераторов и электрических двигателей шло различными путями, что вполне соответствовало состоянию науки об электричестве и магнетизме того периода: принцип обратимости электрической машины, как указывалось выше, был открыт в 30-х годах, но его использование в широких масштабах начинается лишь с 70-х годов прошлого века. В связи с этим представляется вполне правомерным рассматривать отдельно историю создания генератора и электродвигателя в период до 1870 г.

Основные этапы развития электродвигателя

Поскольку все первые потребители электрической энергии питались исключительно постоянным током и этот род тока был наиболее изучен, то и первые электрические машины были машинами постоянного тока.

В развитии электродвигателя постоянного тока можно наметить три основных этапа, впрочем, достаточно условных, так как конструкции и принципы действия электродвигателей, характерных для одного этапа, в отдельных случаях появлялись вновь спустя много лет. С другой стороны, более поздние и более прогрессивные конструкции в их зародышевой форме нередко можно найти в первоначальном периоде развития электродвигателя. Следует иметь в виду, что для характеристики каждого этапа совершенствования электродвигателя в дальнейшем изложении приводятся только наиболее типичные конструкции.

Начальный период развития электродвигателя (1821—1834 гг.) тесно связан с созданием физических приборов для демонстрации непрерывного преобразования электрической энергии в механическую. В 1821 г. Фарадей, исследуя взаимодействие проводников с током и магнитом, показал, что электрический ток вызывает вра-

шение проводника вокруг магнита или вращение магнита вокруг проводника. Следовательно, опыт Фарадея являлся наглядной иллюстрацией принципиальной возможности построения электродвигателя (рис. 5.11).

Возможность превращения электрической энергии в механическую показывалась и во многих других экспериментах. Так, в книге П. Барлоу «Исследование магнитных притяжений», опубликованной в 1824 г., описывалось устройство, известное под названием «колеса Барлоу» и являющееся одним из исторических памятников пред истории развития электродвигателя. Колесо Барлоу представляло собой два медных зубчатых колеса, сидящих на одной

оси, которые соприкасались с ванночками, наполненными ртутью, и находились между полюсами постоянных магнитов; при пропускании тока через колеса они начинали быстро вращаться.

В качестве примера другой конструкции электродвигателя может служить прибор, описанный в 1833 г. английским ученым У. Риччи. Магнитное поле в этом двигателе создавалось постоянным неподвижным подковообразным магнитом, между полюсами которого на вертикальной оси помещался электромагнит. Взаимодействие полюсов постоянного магнита и электромагнита приводило к вращению электромагнита вокруг оси. Направление тока периодически изменялось коммутатором.

Колесо Барлоу не нашло практического применения и до сих пор остается лабораторным демонстрационным прибором. Электродвигатель Риччи вследствие своей примитивной конструкции и незначительной мощности также не мог получить практического применения.

Характерным для первого этапа развития электродвигателя примером, отражающим иное конструктивное направление, может служить прибор американского физика Дж. Генри (рис. 5.12). Генри в 1831 г. опубликовал статью «О качательном движении, производимом магнитным притяжением и отталкиванием», в которой опи-

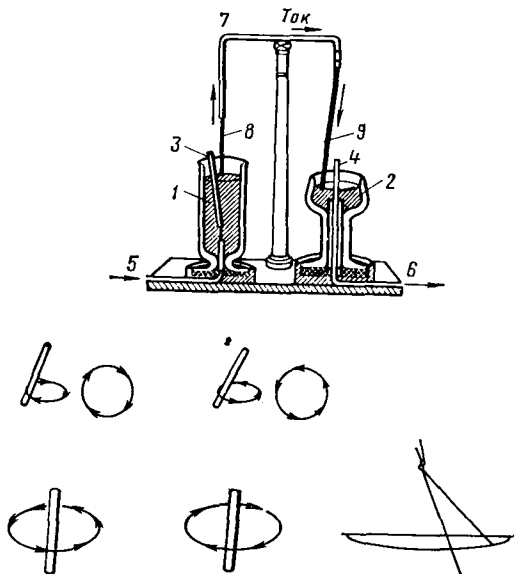


Рис. 5.11. Схема установки Фарадея для демонстрации электромагнитного вращения (по рисунку Фарадея):

1 и 2 — чаши со ртутью; 3 — подвижный магнит; 4 — неподвижный магнит; 5 и 6 — провода, идущие к батарее; 7 — медный стержень; 8 — неподвижный проводник; 9 — подвижный проводник

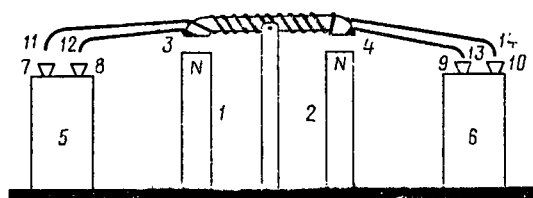


Рис. 5.12. Схема электродвигателя Генри

электромагнита осуществлялось за счет перемены направления тока в его обмотке, соединявшейся посредством проводников 11—14 с гальваническими элементами 5 и 6 (к электродам элементов припаяны чашечки со ртутью 7 и 8, 9 и 10).

Электродвигатель Генри интересен тем, что в этом устройстве впервые сделана попытка использовать притяжение разноименных и отталкивание одноименных магнитных полюсов для получения непрерывного движения (в данном случае — качательного). В модели, построенной самим Генри, электромагнит совершал 75 качаний в минуту. Мощность двигателей подобного типа была очень небольшой: один из таких двигателей, построенный в 1831 г., имел мощность 0,044 Вт и, конечно, не мог использоваться на практике, да и сам изобретатель не придавал ему серьезного значения.

Как на первом этапе, так и позднее было предложено много конструкций двигателей с качательным движением якоря. Однако более прогрессивными оказались попытки построить электродвигатель с вращательным движением якоря.

Второй этап развития электрических двигателей (1834—1860 гг.), характеризуется преобладанием конструкций с вращательным движением явнополюсного якоря. Вращающий момент на валу у таких двигателей обычно был резко пульсирующим.

Наиболее характерные и существенно важные работы по конструированию электродвигателей этого рода принадлежат петербургскому академику Б. С. Якоби. Изучая конструкции электродвигателей с возвратно-поступательным или

сал построенную им модель электродвигателя. Под полюсами горизонтально расположенного электромагнита 3, 4, способного совершать качательное движение, вертикально устанавливались постоянные магниты 1, 2. Изменение полярности

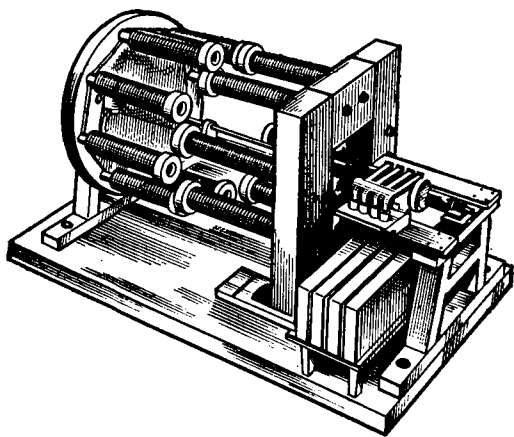


Рис. 5.13. Внешний вид действующей модели электродвигателя Якоби (1834 г.) (Государственный политехнический музей)

качательным движением якоря, Якоби отозвался об одном из них: «такой прибор будет не больше, чем забавной игрушкой для обогащения физических кабинетов, его нельзя будет применять в большом масштабе с какой-нибудь экономической выгодой». Свои усилия он направил на разработку мощного электродвигателя с вращательным движением якоря.

В 1834 г. Якоби построил и описал электродвигатель, который действовал на принципе притяжения и отталкивания между электромагнитами (рис. 5.13). Этот двигатель имел две группы

Π-образных электромагнитов, из которых одна группа (четыре Π-образных электромагнита) располагалась на подвижной раме, а другая аналогичная — на вращающемся диске.

В качестве источника питания электромагнитов применялась батарея гальванических элементов. Для изменения полярности подвижных электромагнитов использовался коммутатор.

Коммутатор представлял собой чрезвычайно важную и глубоко продуманную часть устройства электродвигателя Якоби. Конструктивно он состоял из четырех металлических колец 1—4, установленных на валу и изолированных от него (рис. 5.14); каждое кольцо имело четыре выреза по одной восьмой части окружности. Вырезы заполнялись изолирующими вкладками; каждое кольцо было смещено на 45° по отношению к предыдущему. По окружности кольца скользил рычаг 5, представляющий собой своеобразную щетку; второй конец рычага был погружен в соответствующий сосуд с ртутью, к которому подводились проводники от батареи 6 (сосуды с ртутью являлись наиболее распространенными в то время контактными устройствами). Таким образом, при каждом обороте кольца 4 раза разрывалась электрическая цепь. К электромагнитам вращающегося диска отходили от колец проводники, укрепленные на валу машины. Обмотки всех электромагнитов неподвижной рамы были соединены последовательно и ток в них имел одно и то же направление. Обмотки электромагнитов вращающегося диска были также соединены последовательно, но направление тока в них с помощью коммутатора изменялось 8 раз за один оборот вала. Сле-

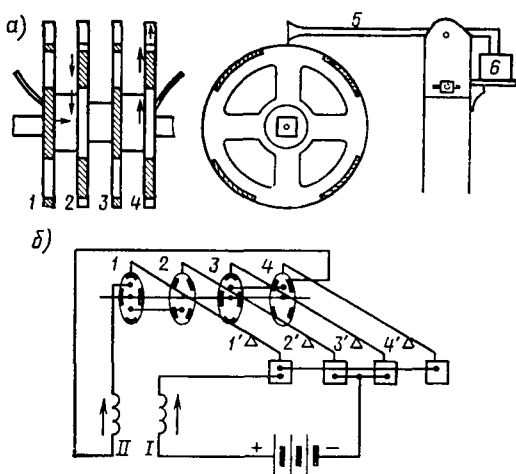


Рис. 5.14. Коммутатор (а) и схема коммутации (б) электродвигателя Якоби:

I — обмотка неподвижной рамы; II — обмотка подвижной рамы; первое и второе, третье и четвертое кольца коммутатора электрически соединены; 1'—4' — сосуды со ртутью (первый и четвертый, второй и третий электрически соединены)

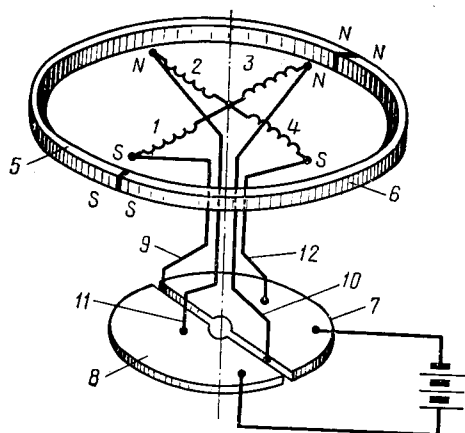


Рис. 5.15. Электродвигатель Девенпорта

довательно, полярность этих электромагнитов также изменялась 8 раз за один оборот вала и электромагниты поочередно притягивались и отталкивались электромагнитами неподвижной рамы. На рис. 5.14 стрелками указаны направления токов для данного положения вала.

Первый электродвигатель, построенный Якоби, мог поднимать груз весом 10—12 фунтов (т. е. примерно 4—5 кгс) на высоту 1 фут (примерно 30 см) в секунду, что составляло мощность около 15 Вт.

Стремление увеличить мощность электродвигателя привело Якоби к созданию конструкции электродвигателя сдвоенного типа, имевшего 24 неподвижных П-образных и 12 подвижных стержневых электромагнитов. Прогрессивным в этом варианте двигателя было то, что подшипники разгружались от аксиальных усилий. Изменение конструкции, однако, не дало значительного увеличения мощности и не позволило применить электродвигатель на практике. Нужно было новое конструктивное решение, которое через несколько лет и нашел Якоби.

Первый электродвигатель Якоби построил в мае 1834 г., а в ноябре того же года представил Парижской академии наук сообщение об этом устройстве. Известие об изобретении Якоби очень быстро распространилось.

В 1837 г. американский техник Т. Девенпорт также построил электродвигатель с непосредственным вращением якоря, в котором взаимодействовали подвижные электромагниты с неподвижными постоянными магнитами. Электродвигатель Девенпорта (рис. 5.15) имел четыре подвижных горизонтальных крестообразно расположенных электромагнита 1—4, укрепленных на деревянном диске, жестко связанном с вертикальным валом. Эти электромагниты были расположены внутри двух постоянных магнитов в форме полуокружностей 5, 6, опирающихся на деревянное кольцо; магниты соприкасались одноименными полюсами и создавали кольцо с двумя полюсами N и S. На особой подставке были расположены медные пластины 8, 7, разделенные посередине изоляцией; к ним подводился ток от источника питания. Концы последовательной обмотки каждой пары электромагнитов имели пружинящие контакты 9—12. Полярность электромагнитов в соответствующие моменты изменялась коммутатором.

Сравнивая электродвигатели Якоби и Девенпорта, следует отметить, что в отношении общего конструктивного решения Девенпорт сделал шаг назад, заменив неподвижные электромагниты постоянными магнитами (которые имеют большой вес и подвержены размагничиванию). Однако в целом двигатель Девенпорта был более компактным благодаря расположению в одной плоскости подвижных и неподвижных магнитов. Это обстоятельство не могло не привлечь внимания Якоби, стремившегося увеличить мощность своего электродвигателя при сравнительно небольшом увеличении его габаритов.

Электродвигатель Якоби, построенный в 1834 г. и описанный выше, широко демонстрировался автором и подвергался опробованию для приведения во вращение различных механизмов. Много усилий было затрачено ученым для осуществления электропривода судна.

В 1837 г. в распоряжение Якоби был предоставлен бот, вмещающий 12 пассажиров и рассчитанный на 10 гребцов, на котором предполагалось установить электродвигатель и произвести соответствующие испытания и технико-экономические подсчеты. В процессе совершенствования двигателя Якоби пошел по пути конструктивного объединения на общем вертикальном валу нескольких электродвигателей в один агрегат, расположив неподвижные и вращающиеся магниты в одной плоскости. При этом увеличивались размеры электродвигателя в вертикальном направлении, что было вполне удобно для опытной судовой установки.

Двигатель Якоби конструкции 1838 г. представлял собой комбинацию 40 небольших электродвигателей (рис. 5.16), объединенных по 20 шт. на двух вертикальных валах, установленных в деревянной станине.

Для питания током обмоток электромагнитов на «электрическом боте» были установлены гальванические элементы. Изменение направления тока в обмотках подвижных электромагнитов осуществлялось коммутаторами, аналогичными описанным выше. Вращение с вертикальных валов с помощью конических шестерен передава-

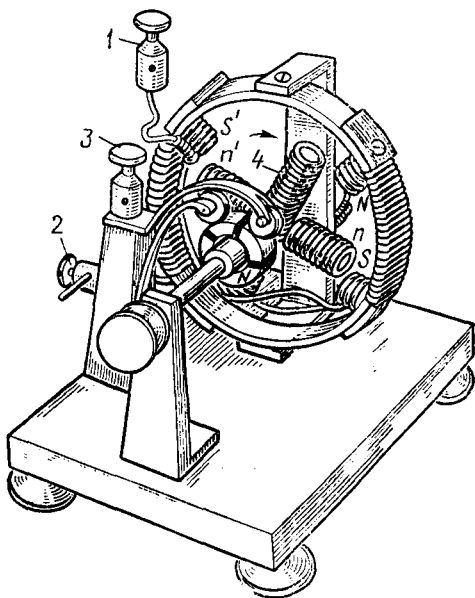


Рис. 5.16. Модель одного элемента электродвигателя Якоби (1838 г.):

1—2 — зажимы обмоток двух неподвижных электромагнитов; 3 — зажим коммутаторного устройства; 4 — один из четырех электромагнитов, расположенных крестообразно

лось на горизонтальный, на котором укреплялись гребные колеса, расположенные по обоим бортам «электрического бота».

Таким образом Б. С. Якоби пошел по пути механического соединения определенного числа элементарных машин. Его работа отражала типичную для середины прошлого века тенденцию в развитии электрических машин, когда ученые, не найдя еще качественно новых решений, пытались удовлетворить потребности практики простым комбинированием большого числа существовавших машин.

Об испытаниях «электрического бота» одна из петербургских газет писала (1839 г.): «...катор с двенадцатью человеками, движимый электромеханической силой (в $3/4$ лошади), ходил несколько часов противу течения, при сильном противном ветре... Что бы ни было впоследствии, важный шаг уже сделан, и России принадлежит слава первого применения теории к практике».

Испытания показали возможность практического применения электродвигателей, но в то же время обнаружили, что при питании их током от гальванических батарей механическая энергия получается чрезмерно дорогой. Вследствие этого была признана крайняя неэкономичность электродвигателей на данном этапе развития электротехники. Необходимо отметить, что для преодоления основного недостатка гальванических батарей — малой энергоемкости — требовалось использовать очень много элементов, а это требование для многих транспортных установок было неприемлемым. Так, например, на боте Якоби вначале было установлено 320 гальванических элементов. Произведенные опыты, а также теоретическое исследование привели Якоби к очень важному для практики выводу: применение электродвигателей находится в прямой зависимости от удешевления электроэнергии, т. е. от создания генератора, более экономичного, чем гальванические батареи.

После разработки более совершенных генераторов тока применение электродвигателя на автономных транспортных установках, в частности на судах, стало возможным только при наличии первичного теплового двигателя, приводящего в движение генератор.

Однако и в тех условиях, когда питание электродвигателей могло осуществляться лишь при помощи гальванических элементов, на практике встречались случаи, когда вместо парового двигателя было выгоднее устанавливать электродвигатель. Поэтому в 50-х и 60-х годах электродвигатели иногда находил применение, например электродвигатель французского электротехника П. Г. Фромана.

Некоторые из электродвигателей, построенные в 40—60-х годах XIX в., действовали на принципе втягивания стального сердечника в соленоид; получавшееся при этом возвратно-поступательное движение преобразовывалось посредством балансира или шатунно-кривошипного механизма во вращательное движение вала, снабженного для равномерности хода маховыми колесами, например электродвигатель Бурбуза (рис. 5.17). Как видно из конструкции электродвигателя, мысль его изобретателя находилась в плену кинематических особенностей работы паровых машин, в которых возвратно-поступательное движение штока поршня преобразовыва-

лось во вращательное движение вала посредством балансира, кривошипно-шатунного механизма и т. п.

Отметим, что в современном электроприводе применяются специальные линейные асинхронные двигатели для привода машин, имеющих возвратно-поступательное движение, что исключает передачи, преобразующие вращательное движение в поступательное и упрощает конструкцию машины.

Рассмотренные электродвигатели действовали по принципу взаимного притяжения и отталкивания магнитов или электромагнитов. Они снабжались якорями простейшей формы в виде стержня с обмоткой (явнополюсными). Этим электродвигателям были свойственны существенные недостатки: большие габариты при сравнительно малой мощности, большое магнитное рассеяние и низкий к. п. д. Кроме того, вращающий момент на валу отличался непостоянством, и в связи с попеременными притяжениями и отталкиваниями стержневых якорей действие таких электродвигателей было толчкообразным. При столь резких и частых изменениях вращающего момента применение двигателя в системе электропривода представлялось малоперспективным.

Третий этап в развитии электродвигателей связан с разработкой конструкций электродвигателей с кольцевым неявнополюсным якорем и практически постоянным вращающим моментом. Первый шаг в этом принципиально новом направлении сделал итальянский ученый Антонио Пачинотти.

Электродвигатель Пачинотти (1860 г.) состоял из якоря кольцеобразной формы, вращающегося в магнитном поле электромагнитов (рис. 5.18). Якорь, имеющий форму стального кольца с зубцами (наличие зубцов уменьшало магнитное сопротивление и облегчало крепление обмотки) и латунными спицами, укреплялся на вертикальном валу. На кольцо между зубцами якоря наматывались катушки, концы которых подводились к пластинам коллектора, расположенного на нижней части вала. Подвод тока к пластинам коллектора осуществлялся роликами. Обмотка электромагнитов, снабженных полюсными наконечниками, включалась последовательно с обмоткой якоря, т. е., согласно современной терминологии, машина имела последовательное возбуждение.

В электродвигателе Пачинотти получался практически постоянный по величине вращающий момент; габариты двигателя были

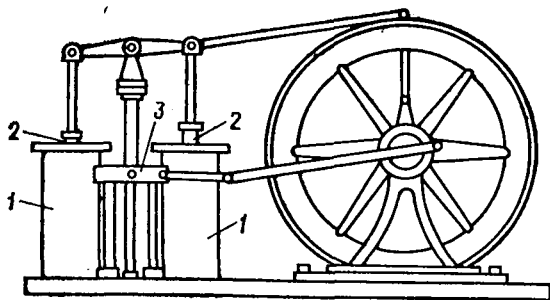


Рис. 5.17. Электродвигатель Бурбуза:
1 и 2 — катушки электромагнитов со втягивающимися сердечниками; 3 — переключатель

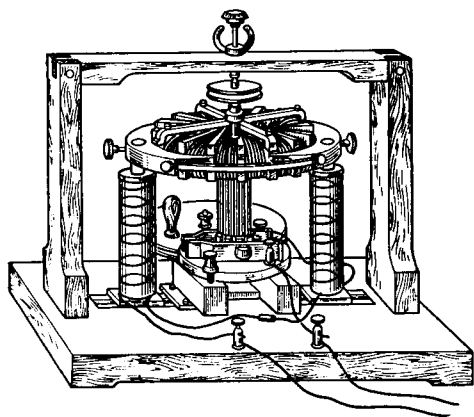


Рис. 5.18. Модель электродвигателя Пачинотти

невелики по сравнению с размерами других электродвигателей равной мощности. Основное значение работы Пачинотти состоит в том, что им был сделан следующий важный шаг на пути создания современной машины постоянного тока: явнополюсный якорь заменен неявнополюсным. К этому следует еще добавить удобную схему возбуждения и коллектор, по существу, современного типа. Любопытно также отметить, что Пачинотти указал на возможность обращения своего двигателя в генера-

тор. Однако, не зная о возможности применения принципа самовозбуждения, он рекомендовал при использовании машины в качестве генератора заменить электромагниты постоянными магнитами.

В 1863 г. Пачинотти опубликовал сведения о конструкции своего электродвигателя, но на эту публикацию не было обращено достаточно внимания, и изобретение было на время забыто. Несмотря на большой интерес с принципиальной точки зрения, двигатель не получил распространения, так как по-прежнему отсутствовал экономичный генератор электрической энергии. Идея кольцевого якоря была возрождена примерно через 10 лет З. Т. Граммом в конструкции электромашинного генератора.

Основные этапы развития электромашинных генераторов

Из рассмотрения истории электродвигателя видно, что его развитие опережало на начальных этапах развитие генератора. Отсутствие хорошего, экономичного генератора электрического тока тормозило расширение области применения электричества. Примерно до 1870 г. наиболее распространенными источниками тока были электрохимические, т. е. гальванические, элементы и аккумуляторы. В дальнейшем преобладающим типом источников электрического тока стали электромашинные генераторы.

Простейшими гальваническими элементами были элементы с одной жидкостью; к числу таких элементов принадлежали вольтов столб и его видоизменения. Но вследствие явления поляризации действие таких батарей быстро ослаблялось, кроме того, они были неудобны в эксплуатации. В 1829 г. А. С. Беккерель (открывший явление поляризации) создал более совершенную конструкцию эле-

мента с двумя жидкостями. По мере усовершенствования эти элементы получили широкое распространение.

Другим направлением в области создания электрохимических источников тока было построение электрических аккумуляторов или «вторичных элементов», как они долгое время назывались.

Принципиальная возможность аккумуляирования электрической энергии была установлена еще в начале XIX в., но только в 1854 г. немецкий врач В. И. Зинстеден открыл способ аккумуляирования. В 1859 г. француз Г. Планте, по-видимому, независимо от Зинстедена наблюдал то же явление и на его основе построил свинцовый аккумулятор.

Несмотря на то что электрохимические источники получили до 70-х годов прошлого века значительное распространение, проблема экономичного источника электрической энергии была решена только созданием совершенной конструкции электромашинного генератора.

Развитие электрических машин наглядно иллюстрирует характерную зависимость в развитии техники вообще. Эта закономерность проявляется в следующем: если развитие какой-либо отрасли техники тормозится недостаточным уровнем развития другой отрасли техники или области науки, то развитие последней ускоряется требованиями первой. Так, если отсутствие экономичного генератора тока сдерживало расширение практических применений электричества, то последние стимулировали, ускоряли работы по созданию более совершенной конструкции генератора.

В развитии электрического генератора, так же как и в развитии электродвигателя, можно наметить три основных этапа.

Первый этап (1831—1851 гг.) характеризуется созданием электрических генераторов с возбуждением от постоянных магнитов; такие генераторы получили в то время название магнитоэлектрических машин.

Открытие в 1831 г. явления электромагнитной индукции указало новый способ получения электрического тока, который нашел свое практическое воплощение в первом униполярном генераторе — диске Фарадея. Одно из наиболее ранних и весьма интересное конструктивное решение генератора с возбуждением от постоянных магнитов было дано в середине 1832 г. анонимным изобретателем, скрывшим свое имя под латинскими буквами Р. М. Его машина была первым однофазным синхронным многополюсным генератором. В первом варианте генератора Р. М. железные сердечники катушек не имели замыкающего магнитопровода. На рис. 5.19 представлен второй вариант генератора Р. М., в который изобретатель внес существенное улучшение: он ввел добавочное стальное кольцо, замкнувшее магнитную цепь сердечников, и поместил на кольце в промежутке между основными катушками добавочные обмотки, соединенные последовательно с обмотками катушек.

С помощью этого генератора удалось разложить воду (поскольку ток был переменным, то при электролизе воды получался гре-

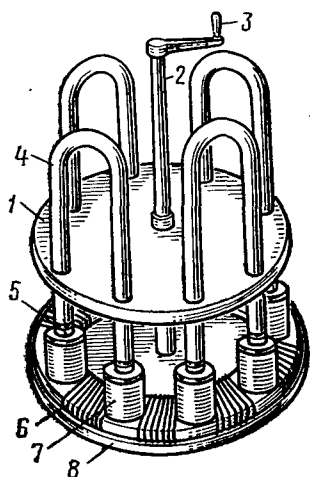


Рис. 5.19. Генератор Р. М. (2-й вариант)

1 — деревянный диск, укрепленный на оси 2, приводимой в движение рукояткой 3; 4 — подвижные постоянные магниты; 5 — железные сердечники катушек 7; 6 — стальное кольцо с добавочными обмотками, замыкающими магнитную цепь сердечников; 8 — подставка

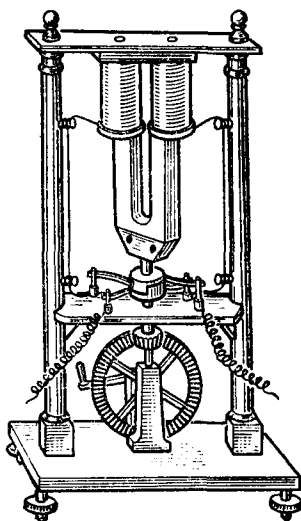


Рис. 5.20. Генератор братьев Пиксии

мучий газ). Переменный ток в то время не мог еще найти себе потребителя, так как для всех практических применений электричества (минная электротехника, только что зародившаяся электромагнитная телеграфия, первые электродвигатели) требовался постоянный ток. Поэтому в последующем изобретатели направили свои усилия на построение генераторов, дающих постоянный электрический ток, разрабатывая для этих целей разнообразные коммутационные устройства.

Впервые приспособление для выпрямления тока в попеременно-полюсной машине (в отличие от униполярной машины Фарадея, которая не нуждалась в устройстве для выпрямления тока, так как давала непосредственно постоянный ток) было применено в 1832 г. в генераторе братьев Пиксии (рис. 5.20). При вращении подковообразного постоянного магнита наводилась переменная э. д. с. в двух неподвижных катушках со стальными сердечниками. Магнит приводился во вращение посредством рукоятки и конической передачи; концы последовательно соединенных катушек выводились к зажимам барабанного коммутатора. В некоторых генераторах для получения тока неизменного направления (но резко пульсирующего по величине) применялось так называемое коромысло Ампера.

Недостатком машин Р. М. и Пиксии явилось то, что в них приходилось вращать более или менее тяжелые постоянные магниты. Целесообразнее оказалось сделать магниты неподвижными, а заставить вращаться более легкие катушки; при этом проще было выполнить и коммутирующее устройство, вращающаяся часть которого была закреплена на валу вместе с якорем. Магнитоэлектрические генераторы такого типа оказались значительно удобнее и именно в такой конструктивной форме впервые вошли в практику.

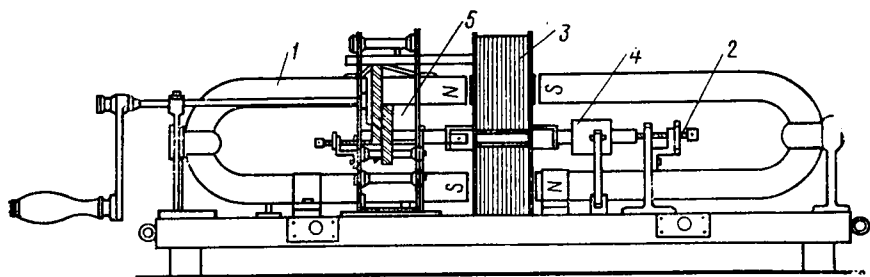


Рис. 5.21. Магнитоэлектрический генератор Якоби

Первым генератором такого типа, получившим практическое применение, был магнитоэлектрический генератор Б. С. Якоби. Занимаясь усовершенствованием методов электрического взрывания мин, Б. С. Якоби построил в 1842 г. генератор, названный им «магнитоэлектрической батареей» (рис. 5.21). При вращении катушек 3 зубчатой передачей 5 в поле постоянных магнитов 1 в них наводилась э. д. с.; на валу 2 имелось коммутирующее устройство 4 в виде двух полуцилиндров, представляющее собой простейший двухпластинчатый коллектор. Этот генератор был принят на вооружение гальванических команд русской армии, использовавших его для воспламенения минных запалов.

Стремление повысить мощность магнитоэлектрических генераторов привело к увеличению числа постоянных магнитов. Этот путь отражал уже знакомую из истории развития электродвигателей тенденцию: для получения значительной мощности соединять несколько элементарных машин в одну. Наибольшее распространение в лабораторной практике 40 — 50-х годов прошлого века получил магнитоэлектрический генератор немецкого электротехника Э. Штерера с тремя вращающимися постоянными магнитами (1843 г.). Этот генератор использовался учеными (в том числе Ленцем и Якоби) для исследования процессов в магнитоэлектрических машинах.

Известный толчок к построению более мощных магнитоэлектрических генераторов дали дуговые лампы с регуляторами, получившие применение на маяках в связи с развитием морского транспорта. Еще в 1849 г. профессор Нолле (Бельгия) принялся за построение мощного магнитоэлектрического генератора для установки на маяках, избрав уже проторенный путь комбинирования в одном агрегате большого числа машин. Работы Нолле были продолжены Ван Мальдереном (Франция) и Холмсом (Англия), и к 1856 г. машина была завершена. Для производства таких генераторов была организована в Париже электропромышленная компания «Альянс» (отсюда произошло и название новой машины).

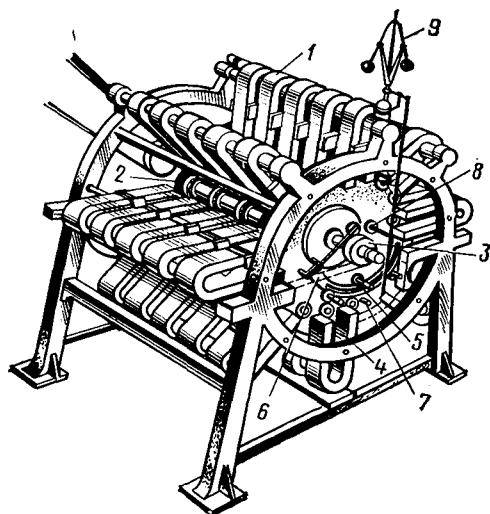


Рис. 5.22. Общий вид генератора «Альянс»:

- 1 — ряды неподвижных постоянных магнитов;
 2 — несущие колеса с катушками-якорями 4;
 3 — коллектор; 5—7 — устройство для смещения роликовых токоприемников 8 с нейтралей;
 9 — центробежный регулятор

В генераторе «Альянс» на чугунной станине были укреплены в несколько рядов подковообразные постоянные магниты, расположенные по окружности и радиально по отношению к валу. В промежутках между рядами магнитов устанавливались на валу кольца с большим числом катушек-якорей (рис. 5.22). В изображенной на рисунке машине было 40 магнитов и 64 стержня (явнополюсных якоря). Различные варианты машины «Альянс» имели разное число рядов магнитов (3, 5, 7). На валу генератора был укреплен коллектор с 16 металлическими пластинами, изолированными друг от друга

и от вала машины. В качестве коллекторных щеток служили специальные ролики. В машине впервые было предусмотрено устройство для смещения роликов в зависимости от нагрузки; перемещение роликов происходило под действием тяг, идущих от центробежного регулятора, который был связан с валом машины.

В генераторе «Альянс» можно было варьировать соединение обмоток катушек, в результате чего менялась э. д. с. в цепи. Вследствие этого генератор мог давать либо большой ток низкого напряжения и служить, например, для целей гальванопластики и электролиза, либо ток меньшей силы, но более высокого напряжения (40—250 В) для питания дуговых ламп.

В течение 1857—1865 гг. в эксплуатации было около 100 машин «Альянс». Для привода одной такой машины требовался паровой двигатель мощностью 6—10 л. с. Вес шестидисковой машины «Альянс» доходил до 4 тс, причем только одни магниты весили более 1 тс.

Генератор «Альянс» нагляднее, чем другие меньшие по размерам машины, показал недостатки, присущие вообще магнитоэлектрическим машинам. Под действием реакции якоря, в результате естественного старения и возможных вибраций постоянные магниты быстро размагничивались, в связи с чем э. д. с. генератора уменьшалась и его мощность снижалась. Во всех этих машинах применялись стержневые якоря, имевшие многослойную обмотку; при работе они быстро нагревались вследствие плохого отвода теп-

ла, что приводило к разрушению изоляции. Вес и габариты магнитоэлектрических генераторов, несмотря на их небольшую мощность, были весьма значительными, и крупные машины были сравнительно дорогими. Принципиальным недостатком машин с явнополюсными якорями явилось то, что они давали ток, резко пульсирующий по величине.

Увеличение мощности магнитоэлектрических машин должно было идти другим путем. Исследования в области электромагнетизма показали, что при помощи электромагнита можно получить значительно большие величины магнитной индукции в магнитной цепи электрической машины, чем при помощи постоянных магнитов. Следовательно, генератор с электромагнитами при прочих равных условиях мог дать большую величину э. д. с. и большую мощность.

Так начался второй этап развития электрического генератора (1851—1867 гг.), занявший сравнительно небольшой отрезок времени. Он характеризуется преобладанием генераторов с независимым возбуждением. Первое предложение о замене постоянных магнитов электромагнитами, возбуждаемыми током от магнитоэлектрической машины, было сделано в 1851 г. В. И. Зинстеденом.

В качестве характерного примера генератора с электромагнитами, обмотки которых питались токами от независимого источника, может быть указан генератор англичанина Г. Уайльда (1863 г.). Этот генератор (рис. 5.23) имел П-образный электромагнит 1, для питания которого был приспособлен отдельный возбудитель — небольшой магнитоэлектрический генератор 2 (справа на рисунке двух-Т-образный якорь).

Вместо обычно применявшегося стержневого якоря Уайльд использовал предложенный в 1856 г. немецким электротехником и предпринимателем В. Сименсом якорь с сердечником двутаврового сечения (так называемый «двух-Т-образный» якорь), который является разновидностью явнополюсного якоря. Этот якорь имел форму вала с продольными выточками, в которые укладывалась обмотка. Машина с двух-Т-образным якорем обладала меньшим магнитным рассеянием, чем со стержневым, но в то же время этот якорь, как и стержневой, имея многослойную обмотку с плохим теплоотводом, сильно грелся при работе и тем самым ограничивал мощность установки.

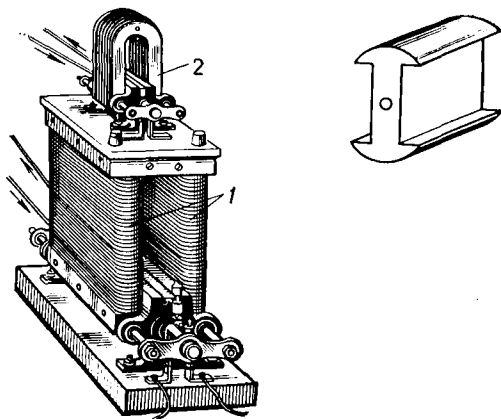


Рис. 5.23. Генератор Уайльда

Машина Уайльда подготовила конструкторскую мысль к созданию генераторов с самовозбуждением. Действительно, более естественным было питать обмотку возбуждения генератора Уайльда не током от отдельного источника, а током самой этой машины, соединив, например, последовательно обмотку возбуждения с обмоткой якоря. После 1867 г. с открытием принципа самовозбуждения в развитии электрического генератора начался третий этап.

Принцип самовозбуждения получил широкую известность только после 1867 г., когда почти одновременно в разных странах были построены генераторы с самовозбуждением. Однако впервые этот принцип был открыт еще в начале 50-х годов.

В 1854 г. датский изобретатель С. Хиорт взял английский патент на машину с самовозбуждением, в котором описывался принцип самовозбуждения. Однако, опасаясь, что остаточного магнетизма не будет хватать для начального импульса, Хиорт наряду с электромагнитами применил и постоянные магниты. Следовательно, эта машина фактически имела комбинированное возбуждение и являлась как бы промежуточным типом между машинами магнитоэлектрическими и машинами с самовозбуждением.

В 1856 г. венгерский физик Аньош Йедлик независимо от Хиорта пришел к выводу о том, что если обмотки возбуждения присоединить к зажимам якоря того же генератора, то при пуске машины развивается процесс самоусиления магнитного поля. Вместе с тем Йедлик заметил, что для возникновения этого процесса нет необходимости в установке постоянных магнитов (как это делал Хиорт), а вполне достаточно остаточного магнетизма. Так Йедлик совершенно сознательно сформулировал не только принцип самоусиления магнитного поля, но и принцип самовозбуждения генератора; в 1861 г. он построил самовозбуждающийся генератор.

Работы Хиорта и Йедлика были несколько преждевременными, и, кроме того, изобретатели не располагали необходимыми средствами для промышленного изготовления машин в больших масштабах. На их идеи не было обращено достаточного внимания. В 1866 г. английские инженеры Кромвель и Сэмьюэл Варли, а в начале 1867 г. В. Сименс и английский физик Ч. Уитстон выступили с описанием принципа самовозбуждения, который фактически был уже предложен ранее. Почти одновременная разработка принципа самовозбуждения в разных странах наглядно иллюстрирует одну из характерных закономерностей в развитии техники.

Существенным недостатком первых генераторов с самовозбуждением являлась весьма несовершенная конструкция якоря. Так, двух-Т-образный якорь не только ограничивал мощность машин из-за быстрого нагрева, но давал резко пульсирующий ток. В этом отношении двух-Т-образный якорь ничем не отличался от стержневого, поскольку и тот и другой были только разновидностями неудачного явнополюсного исполнения якорей машин постоянного тока.

Событием, революционизировавшим развитие электрической машины, положившим начало промышленной электротехнике, яви-

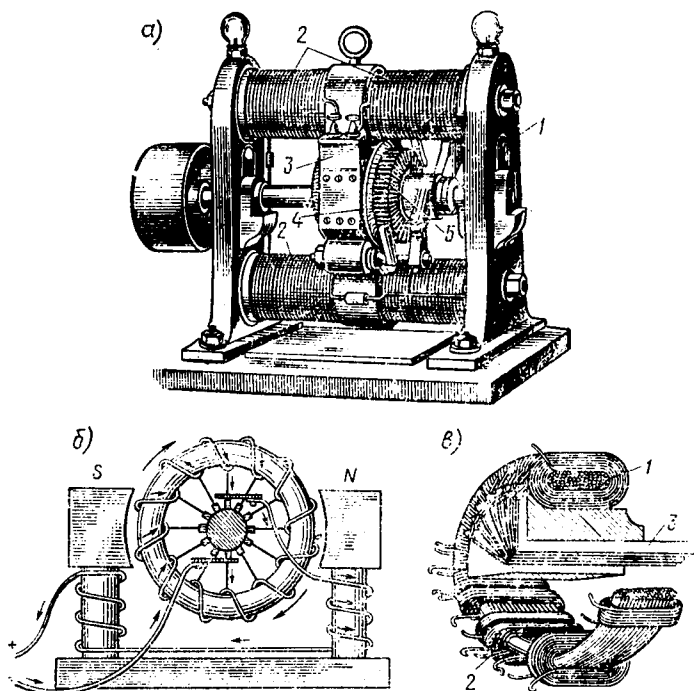


Рис. 5.24. Самовозбуждающийся генератор Грамма для питания осветительных установок

лось объединение принципов самовозбуждения с конструкцией кольцевого якоря.

Разработка самовозбуждающихся генераторов с кольцевыми и барабанными якорями и развитыми магнитными системами составила основное содержание третьего этапа в развитии электрических генераторов.

Первый патент на самовозбуждающийся генератор с кольцевым якорем был получен сотрудником фирмы «Альянс» З. Граммом в 1870 г.

На рис. 5.24, *а*, изображен самовозбуждающийся генератор Грамма с кольцевым якорем, предназначавшийся для питания осветительных установок. На станине 1 укреплены электромагниты 2 с полюсными наконечниками 3, между которыми вращается якорь 4, в специальных держателях укреплены щетки, соприкасающиеся с почти современного типа коллектором 5. Якорь приводится во вращение через приводной шкив. Обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря.

Как уже отмечалось, кольцевой якорь был изобретен Пачинотти в 1860 г. Грамм в своем патенте указывал, что сердечник якоря (рис. 5.24, *в*) может изготавливаться из пучка стальных проволок 1,

благодаря чему должны заметно снизиться потери на вихревые токи (2 — секция обмотки, 3 — коллекторная пластина).

На рис. 5.24, б дана схема соединения обмотки якоря с обмоткой возбуждения. В своей работе Грамм предусмотрел возможность создания многополюсных машин. Вместе с тем по сравнению с работами Пачинотти Грамм сделал шаг назад, изготовив свой якорь без зубцов, что, с одной стороны, усложнило крепление обмотки, а с другой — увеличило магнитное сопротивление воздушного зазора, а также увеличило потери в меди якоря. Грамм применил кольцевой якорь сначала для магнитоэлектрических генераторов, а затем снабдил кольцевым якорем машину с самовозбуждением, что и явилось громадным шагом вперед. Одним из важнейших преимуществ кольцевого якоря было то, что он позволял получать постоянный ток, практически неизменный по величине. Такой ток полностью отвечал тем требованиям, которые предъявлялись условиям возбуждения генератора.

Конструкция машины, конечно, не выдерживала критики с точки зрения конфигурации магнитопровода, но усовершенствования этого рода могли последовать только в 80-х годах, после того как были разработаны методы расчета магнитной цепи. Позднее Грамм предложил еще несколько конструкций самовозбуждающихся машин, различных по внешнему виду и по мощности, но принципиальных изменений в свою машину он больше не вносил.

Генератор Грамма оказался весьма экономичным источником электрической энергии, позволявшим получать значительные мощности при высоком к. п. д. и сравнительно малых габаритах и весе. Сравнение машины Грамма, например, с машиной «Альянс» показывает, что самовозбуждающийся генератор с кольцевым якорем имел вес на 1 кВт примерно в 6 раз меньший, чем генератор с постоянными магнитами.

Очевидные преимущества генератора Грамма способствовали тому, что этот генератор быстро вытеснил другие типы и получил очень широкое распространение. В начале 70-х годов принцип обратимости электрических машин был уже хорошо известен, и машина Грамма использовалась как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Таким образом, в начале 70-х годов обе линии развития электрических машин — генератора и двигателя — объединились.

Машина Грамма представляла собой машину постоянного тока современного типа. Однако она нуждалась в определенных усовершенствованиях, которые и последовали в 70—80-х годах прошлого века.

Одно из наиболее существенных улучшений, состоявшее в замене кольцевого якоря барабанным (рис. 5.25), было осуществлено в 1873 г. немецким электротехником Ф. Гефнер-Альтенском. Основным недостатком кольцевого якоря являлось плохое использование меди в его обмотке, так как части витков обмотки, находившиеся на внутренней поверхности кольца, не использовались. В барабанном же якоре обе стороны каждой секции участвовали в создании

э. д. с., а не работали только лобовые части обмотки. С 1878 г. барабанный якорь стали делать зубчатым, что позволило более надежно крепить обмотки и уменьшить воздушный зазор в машине.

Борьба за снижение потерь в теле якоря привела в 1880 г. известного американского изобретателя Т. А. Эдисона к мысли изготовлять якорь шихтованным, т. е. набранным из тонких стальных листов, оклеенных бумагой (впоследствии

оклейка стальных листов бумагой была заменена лакировкой этих листов). В том же 1880 г. для улучшения условий охлаждения якоря американский изобретатель Х. Максим предложил разделять шихтованный якорь на пакеты; это давало возможность образовывать в теле якоря каналы для прохождения воздуха. С 1885 г. началось применение шаблонной обмотки, что значительно улучшило ее качество и снизило стоимость машин. Важным усовершенствованием машины постоянного тока явилось введение в 1884 г. компенсационной обмотки, а в 1885 г. — дополнительных полюсов, с помощью которых удавалось компенсировать реакцию якоря и улучшить коммутацию. В 1891 г. Э. Арнольдом была опубликована первая работа, посвященная теории и конструированию обмоток электрических машин.

Так в течение 70—80-х годов машина постоянного тока приобрела все основные черты современной машины. Дальнейшие усовершенствования не затрагивали основных принципов и конструктивных узлов машины и были направлены на повышение качества, улучшение использования активных материалов и усовершенствование изоляции, на повышение качества щеток и пр.

В рассматриваемый период было положено начало исследованиям процессов в электрических машинах. В 1840 г. Б. С. Якоби было описано явление противо-э. д. с. В 1847 г. Э. Х. Ленц открыл явление, получившее название «реакции якоря», и предложил смешать щетки с геометрической нейтральной на физическую. Первый математический анализ процессов в машине с самовозбуждением был сделан в 60-х годах Д. К. Максвеллом. Огромную роль в развитии электромашиностроения сыграли труды А. Г. Столетова по исследованию магнитных свойств «мягкого железа» (1871 г.). В 1880 г. после открытия немецким физиком Варбургом явления ги-

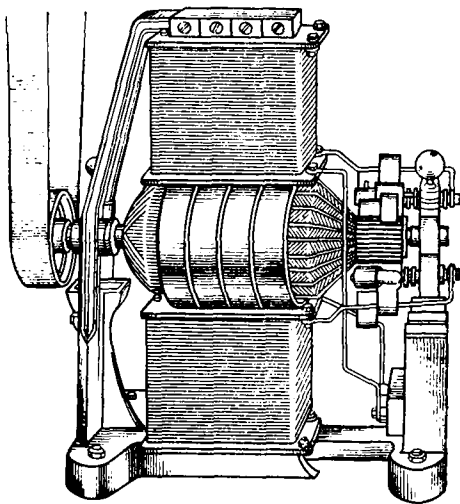


Рис. 5.25. Одна из первых электромашин с барабанным якорем

стерезиса начались исследования потерь в стали при перемагничивании (английский ученый Д. Юинг, американский электротехник Ч. П. Штейнмец). Большое значение для проектирования электрических машин и аппаратов имели работы английского электротехника Дж. Гопкинсона, сформулировавшего (в начале 80-х годов) закон магнитной цепи. Все эти открытия способствовали переходу от грубой эмпирики к достаточно строгому анализу и к проектированию электротехнических устройств.

НАЧАЛО ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ЗАРОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Как уже отмечалось, в рассматриваемый период электрическая энергия не могла получить широкого практического применения вследствие отсутствия экономичных генераторов. Но это относится к так называемым энергетическим применениям электричества, при которых затрата энергии пропорциональна количеству получаемого продукта, интенсивности производственного эффекта.

Что же касается неэнергетических применений, не требующих значительных затрат электроэнергии, когда она используется лишь в качестве вспомогательного средства для передачи сигналов (телеграфия, телефония, электрическое взрывание мин, дистанционное управление и др.), то именно такие неэнергетические применения положили начало практическому использованию электричества.

Расширение неэнергетических применений электричества сыграло значительную роль в развитии электротехники вообще, так как в процессе создания разнообразных устройств такого рода неизбежно приходилось разрешать ряд практических и теоретических проблем в области электротехники: совершенствовать источники питания, создавать разнообразные приборы и приспособления, в том числе и автоматические, изготавливать изолированные проводники, исследовать свойства различных материалов, разрабатывать методы измерений, устанавливать единицы измерения величин. Все это привело к разработке схем и методов, получивших применение в современной телемеханике и телеуправлении, например, кодоимпульсного метода, принципа синхро-синфазной связи, распределителей, исполнительных устройств.

Первым электротехническим устройством, предназначенным для широкого практического использования, был электрический телеграф. Наиболее совершенным оказался электромагнитный телеграф, выгодно отличавшийся от предшествовавших ему электростатического и электролитического телеграфов.

Первый практически пригодный электромагнитный телеграф был разработан русским ученым и электротехником П. Л. Шиллингом в 1828—1832 гг. Этот телеграф был основан на визуальном приеме кодовых знаков (рис. 5.26) и явился исходной конструкцией последующих телеграфов. Шиллингом впервые был внедрен в область электрической передачи кодированный сигнал, чем было

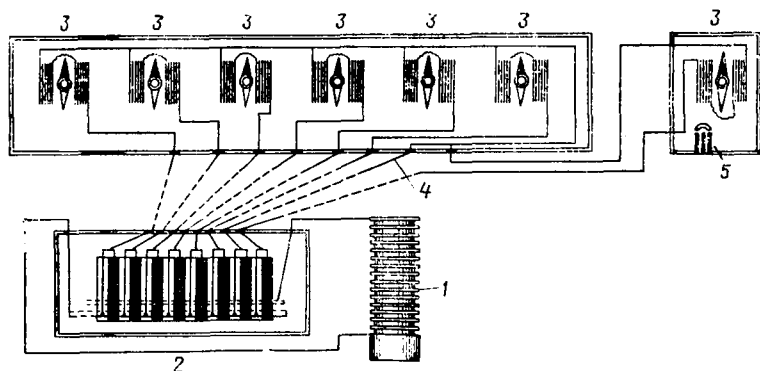


Рис. 5.26. Схема телеграфа Шиллинга:

1 — вольтов столб; 2 — клавиатура (передатчик); 3 — приемник; 4 — обратный провод; 5 — шесть рабочих мультипликаторов и один вызывной

положено начало кодоимпульсному методу, который получил применение в современной телемеханике.

В процессе разработки проекта подводной телеграфной линии Петергоф — Кронштадт (1837 г.) Шиллингом был впервые применен каучук для изолирования подводного кабеля, а также указана возможность использования воды или земли в качестве обратного провода.

Из всех предложенных после Шиллинга конструкций электромагнитных телеграфов наиболее широкое применение получил телеграф американца С. Морзе (1844 г.). Заслуживает внимания разработанный Б. С. Якоби принцип электрической синхронно-синфазной связи, лежащей в основе современной техники дистанционной передачи и следящего электропривода. В таком телеграфе Якоби стрелки передающего и приемного аппаратов совершали равномерно-прерывистое шаговое движение, перемещаясь с одинаковой скоростью (синхронно) и занимая одинаковое пространственное положение (синфазно). В середине XIX в. были разработаны конструкции буквопечатающих телеграфов (1850 г. — Якоби, 1855 г. — Юз).

Среди первых применений электричества отметим использование его в военном деле, прежде всего для воспламенения пороховых зарядов. Эта проблема впервые была успешно разрешена в 1812 г. Шиллингом, осуществившим на Неве опыт по электрическому взрыванию подводных мин.

Дальнейшие работы в области минной электротехники развивались в направлении совершенствования электрических запалов, создания специальных электрических машин и приборов для их питания («взрывные» машинки, индукционные катушки) и автоматизации самого процесса взрывания мины при ее соприкосновении с кораблем. Так, например, Якоби в начале 40-х годов были разработаны специальный магнитоэлектрический генератор и индукционный прибор, которые были приняты на вооружение русской армии.

Созданием этих приборов было положено начало батарейной и генераторной системам зажигания с применением индукционной катушки. Именно в минном деле впервые получил применение такой широко распространенный электротехнический прибор, как индукционная катушка, предложенная в 1843 г. Якоби. Б. С. Якоби, а также многими другими отечественными и зарубежными военными электротехниками были разработаны разнообразные электроавтоматические приборы, обеспечивающие взрыв мины при ее соприкосновении с кораблем.

Характерной особенностью рассматриваемого периода являются первые попытки использования электрической энергии для целей автоматического контроля, управления и регулирования. Если ранее для этого применялись различные механические устройства, то начиная с 30-х годов XIX в. в автоматических приборах и установках получают все большее применение разнообразные электромеханические элементы. Происходит качественный сдвиг в развитии автоматики и телемеханики: зарождается новая область техники — электроавтоматика. Эффективность использования электричества в автоматических и телемеханических устройствах определялась прежде всего свойством электрического тока быстро распространяться по проводу.

Основными элементами простейших электроавтоматических и телемеханических устройств были электромагниты и электромагнитные реле. К их числу могут быть отнесены электромагнитные реле в телеграфах Шиллинга и Якоби, электромеханический регистратор импульсов в пишущих телеграфах, устройства синхронизированного вращения в стрелочном и буквопечатающем телеграфах, релейные устройства для автоматического замыкания электрической цепи в телеграфах и минных установках.

В середине прошлого века разрабатываются электроавтоматические устройства для регистрации малых промежутков времени, контроля некоторых производственных процессов, создается ряд схем дистанционного управления.

Одним из первых наиболее совершенных регистрирующих устройств была электробаллистическая установка русского военного электротехника К. И. Константинова (1842—1845 гг.) с электромагнитным хроноскопом и автоматическим переключателем цепей — прототипом распределителя — элемента современных автоматических и телемеханических установок. Автоматический переключатель (рис. 5.27) действовал следующим образом: двухступенчатый деревянный цилиндр 1 приводился во вращение грузом 2. При прохождении тока через электромагнит 5 тормозящий рычаг 3, посаженный на ось 4, удерживал цилиндр от вращения. После выстрела ядро разрывало проволоку щита I и цепь электромагнита — источник тока (зажим 8) размыкалась. Спиральная пружина 9 отводила тормозящий рычаг до упора 10. Цилиндр вращался до тех пор, пока контактная пластина 7 не соединялась с пружиной следующего щита III, и цепь электромагнита снова размыкалась. С помощью такого устройства Константинову удалось осуществить из-

мерение малых промежутков времени с точностью до 0,00006 с. Приборы, созданные Константиновым, автоматически сигнализировали и регистрировали момент прохождения ядра сквозь щит.

Самым распространенным электроавтоматическим устройством в 50—70-х годах XIX в. были электромагнитные регуляторы в дуговых электрических лампах, обеспечивающие автоматическое регулирование расстояния между электродами дуги. До появления свечи Яблочкова в 1876 г. (см. гл. 6) электромагнитный регулятор являлся наиболее важным конструктивным узлом дуговых ламп, без которого последние не могли работать. Большинство дуговых ламп отличалось друг от друга только устройством регулятора.

По характеру электрической схемы питания регуляторы разделяли на три группы: регуляторы с последовательным питанием, параллельные и дифференциальные регуляторы. В регуляторах с последовательным питанием обмотка электромагнита включалась последовательно, а с параллельным — параллельно с дугой (рис.

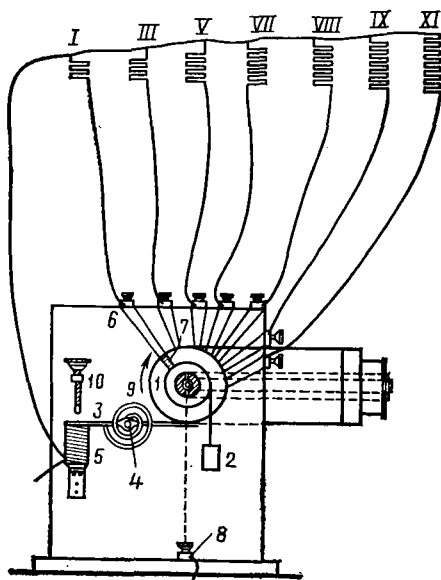


Рис. 5.27. Схема автоматического переключателя

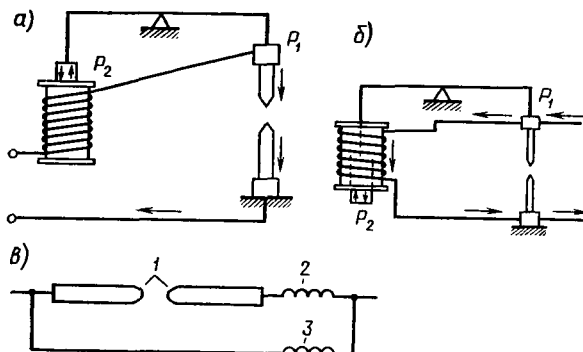


Рис. 5.28. Схема автоматических регуляторов с последовательным (а), параллельным (б) и смешанным (в) включением:

P_1 — вес углероджержателя; P_2 — вес сердечника электромагнита; 1 — угли; 2 — последовательная обмотка; 3 — параллельная обмотка

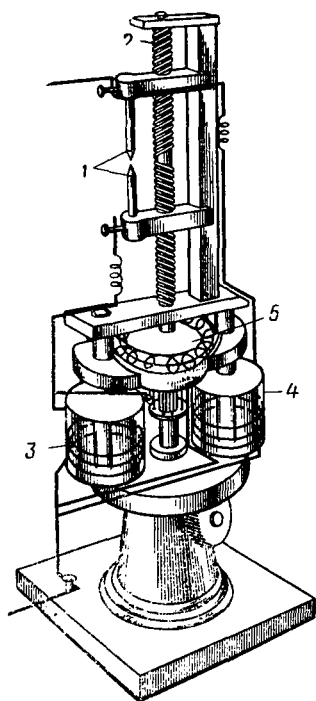


Рис. 5.29. Дуговая лампа Чиколева с электромашинным регулятором

5.28, а, б). В дифференциальном регуляторе (рис. 5.28, в) горение дуги регулировалось как последовательной, так и параллельной обмотками. После включения лампы регулятор работал при любом положении углей.

Наиболее совершенные дифференциальные регуляторы были разработаны В. Н. Чиколевым в 1869—1879 гг., в частности, им впервые в мировой электротехнической практике был применен метод электромашинного регулирования. На рис. 5.29 показана дуговая лампа Чиколева с электромашинным регулятором: последовательная и параллельная обмотки регулятора служили обмотками возбуждения двигателя 3, 4. Действие электромагнитов было встречным: при обгорании углей 1 усиливалось действие параллельной обмотки, якорь 5 вращал вал 2 в одну сторону, и угли сближались. При чрезмерном сближении углей усиливалось действие последовательной обмотки, и угли раздвигались.

В 60—70-х годах XIX в. в связи с развитием телефонии создаются специальные автоматические устройства — искатели, коммутаторы и др. Ведется разработ-

ка электротермических, электрохимических, электромагнитных и электромашинных устройств.

В рассматриваемый период было положено начало и энергетическим применениям электричества, в частности, начинает развиваться промышленная электрохимия. Развитие промышленной электрохимии в огромной мере обязано открытию Б. С. Якоби в 1838 г. явления гальванопластики, которая позволила с помощью электролиза получать точные копии с поверхности предметов и сразу же нашла практическое применение в полиграфии, медальерном деле и других отраслях промышленности. Она явилась истоком созданного Якоби метода нанесения на поверхность предмета металлических покрытий — гальваностегии. В середине прошлого века в России и за границей возникли крупные гальванотехнические промышленные предприятия, на многих заводах были созданы гальванические мастерские.

Развитие промышленной электрохимии также сыграло важную роль в развитии электротехники, вызвав необходимость совершенствования источников постоянного тока (в частности, создания экономичного генератора) и углубления электрохимических исследований.

Развитие исследований в области электрических и магнитных явлений и расширение их практического применения вызвали необходимость разработки методов измерений основных электрических величин и создания электроизмерительных приборов.

Принцип действия первых электрических измерительных приборов был основан на отклонении магнитной стрелки электрическим током; такие приборы являлись лишь индикаторами тока. Первым из них был мультипликатор австрийского физика И. Х. Швейггера, созданный в 1820 г. Он представлял собой рамку, состоящую из нескольких витков проволоки, внутри которой помещалась магнитная стрелка. Для устранения влияния земного магнетизма Ампер (в 1821 г.) предложил использовать две магнитные стрелки, укрепленные на общей оси и расположенные параллельно друг другу так, чтобы полюсы стрелок были обращены в разные стороны. Так была создана первая аstaticкая система. В первых стрелочных приборах, служивших для измерения тока, синус или тангенс угла отклонения стрелки был пропорционален величине тока, поэтому такие приборы назывались соответственно синус-гальванометрами и тангенс-гальванометрами.

Первая попытка отградуировать гальванометр была сделана в 1839 г. Б. С. Якоби.

Уже в первой половине XIX в. создаются более чувствительные и точные гальванометры, электродинамометр, аstaticкий гальванометр и т. п. Были разработаны баллистический (Э. Х. Ленц, 1832 г.) и компенсационный (немецкий физик И. Поггендорф, 1841 г.) методы измерений, мостовая измерительная схема (Ч. Уитстон, 1843 г.) и др.

В 40—60-х годах разрабатываются первые конструкции реостатов («вольтагометр» Якоби), реохордов (Поггендорф), магазинов сопротивлений и других подобных устройств.

В рассматриваемый период стабилизируются наименования основных электрических величин, постепенно устанавливаются термины: э. д. с., сила тока, электрическое сопротивление, количество электричества и др. Электрические единицы и эталоны были утверждены на Чикагском электротехническом конгрессе в 1893 г.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

ПРЕДПОСЫЛКИ ПЕРЕХОДА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА НОВЫЙ КАЧЕСТВЕННЫЙ УРОВЕНЬ. РОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ В СТАНОВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

До 70-х годов XIX в. энергетическая техника характеризовалась преимущественным применением паровой машины. Паросиловые установки создавались на каждом, даже небольшом промышленном предприятии. При этом возникал ряд существенных трудностей: огромные затраты на строительство котельного и машинного отделений, громоздкость установок, их опасность в пожарном отношении. Привод многочисленных отдельных исполнительных механизмов нужно было осуществлять с помощью громоздких трансмиссий. Поэтому все более ощущалась необходимость в экономичном двигателе малой мощности. В этом направлении развивалась изобретательская мысль. В результате создаются принципиально новые двигатели — внутреннего сгорания и электрические.

Расширению практических применений электродвигателей препятствовало отсутствие экономичного генератора электрической энергии. Создание электромашинного самовозбуждающегося генератора с кольцевым якорем делало реальным развитие энергетических применений электричества и, казалось, создавало возможность для внедрения электродвигателя в промышленность. Но, как будет показано далее, двигатели постоянного тока, имевшиеся к началу 70-х годов, были непригодны для промышленного привода, и поэтому основное применение электрическая энергия находит для освещения.

Электрическое освещение — первое массовое энергетическое применение электрической энергии — сыграло исключительно важную роль в становлении электроэнергетики и превращении электротехники в самостоятельную отрасль техники.

Чем было вызвано такое интенсивное развитие электрического освещения? В течение первой половины XIX в. господствующее положение занимало газовое освещение, имевшее существенные преимущества перед лампами с жидким горючим: централизация снабжения установок светильным газом, сравнительная дешевизна горючего, простота газовых горелок и простота обслуживания. Но по мере развития капиталистического производства, роста городов, строительства крупных производственных зданий, гостиниц, магазинов, зрелищных помещений оно все менее удовлетворяло требо-

ваниям практики, так как было опасно в пожарном отношении, вредно для здоровья, а сила света отдельной горелки была мала. Для текстильных и швейных фабрик, типографий, деревообделочных цехов, театров и т. д. газовое освещение создавало угрозу пожаров. Особенно недостатки газового освещения стали сказываться на крупных предприятиях с большим числом рабочих, занятых на производстве по 12—14 ч в сутки, вызывая резкое снижение производительности труда.

Электрическое освещение не имело многих недостатков газового освещения. Конструирование источников электрического освещения шло в двух направлениях: использования электрической дуги (дуговые лампы) и явления накаливания проволоки током (лампы накаливания). В ходе разработки конструкций дуговых ламп возникла задача регулировать расстояние между электродами. Поэтому и вся история дуговых ламп представляет собой, по существу, разработку конструкций различных регуляторов. Наиболее простыми регуляторами были электромагнитные — первые электроавтоматические приборы. Получили распространение лампы с регуляторами комбинированного — электромагнитного и механического — действия (например, дуговая лампа русского изобретателя А. И. Шпаковского)*. Для питания дуговых ламп пользовались гальваническими батареями или электрическими генераторами (например, машина «Альянс»). Таким образом, электрическое освещение явилось одним из важнейших стимулов развития электрических машин и электрохимических источников тока.

Лампы накаливания до 70-х годов XIX в. не получили сколько-нибудь заметного применения из-за своего несовершенства. Трудности были в изыскании дешевого и долговечного материала для тела накала и методов получения вакуума. Эксперименты показали возможность использования в качестве тел накала не только платины (что было очень дорого), но и угольных стержней (Жобар, 1838 г.), обугленного бамбукового волокна (Г. Гебель, 1854 г.), обугленных полосок бристольского картона или толстой бумаги (Д. У. Сван, 1860 г.).

Появление экономичных электромашинных генераторов и достижения в технике электрического освещения создали в начале 70-х годов условия для более интенсивного развития электротехники.

Необходимо было так усовершенствовать конструкции самих источников света, чтобы они были простыми и надежными, доступными для широкого потребления.

Успешное решение этой проблемы тесно связано с изобретением в 1876 г. русским электротехником П. Н. Яблочковым «электрической свечи» — дуговой лампы без регулятора. Создание этого простого и удобного источника света сыграло исключительно важную

* Эти лампы были впервые успешно использованы для освещения большой площади перед Лефортовским дворцом во время коронационных торжеств в Москве в 1856 г.

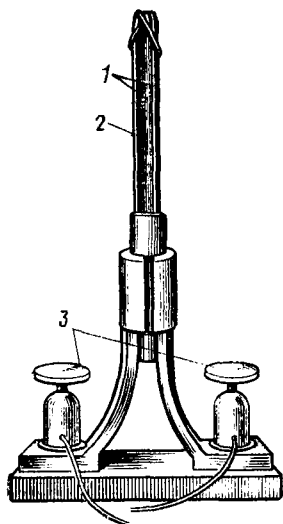


Рис. 6.1. Электрическая свеча Яблочкова:

1 — угольные электроды;
2 — изолирующий слой; 3 —
зажимы для подключения к
источнику электроэнергии

роль не только в переходе от опытов электрического освещения к его широкому внедрению в практику, но и в развитии электротехники вообще.

В отличие от предшествующих конструкций дуговых ламп с соосным горизонтальным или вертикальным расположением электродов угли в электрической свече Яблочкова были установлены параллельно друг другу и разделялись тонким изолирующим слоем каолина (рис. 6.1). Именно поэтому расстояние между их концами при работе лампы не изменялось и, следовательно, отпадала необходимость в регуляторе. По мере сгорания высота электродов уменьшалась, и они постепенно выгорали подобно свече. Отсюда и произошло название дуговой лампы Яблочкова «электрическая свеча», под которым она и обошла почти весь мир. Одна электрическая свеча могла гореть около 2 ч; при установке нескольких свечей в специальном фонаре, оборудованном переключателем для включения очередной свечи вместо перегоревшей, мож-

но было обеспечить бесперебойное освещение в течение более длительного времени.

Изобретение электрической свечи способствовало внедрению в практику переменного тока. В течение всего предшествующего периода электрическая техника базировалась на постоянном токе (телеграфия, гальванотехника, минное дело). Дуговые электрические лампы с регуляторами также питались постоянным током. При этом положительный электрод сгорал быстрее отрицательного, поэтому его приходилось брать большего диаметра.

Яблочков установил, что для питания свечи лучше применять переменный ток, в этом случае при электродах одинакового диаметра получалась вполне устойчивая дуга. В связи с тем, что осветительные установки по системе Яблочкова стали подключать к источникам переменного тока, заметно возрос спрос на генераторы однофазного переменного тока, которые раньше не находили практического применения. О значении электрической свечи в расширении производства электрических генераторов переменного тока можно судить по следующему примеру: если до появления электрической свечи завод Грамма выпускал в течение 1870—1875 гг. по несколько десятков машин в год, то за 1876 г. выпуск генераторов возрос почти до 1000 шт. Заводы изготовляли электрические генераторы, специально предназначенные для установок электрического освещения, и даже мощность машин обозначалась по числу питаемых электрических свечей (например, «шестисвечная машина»).

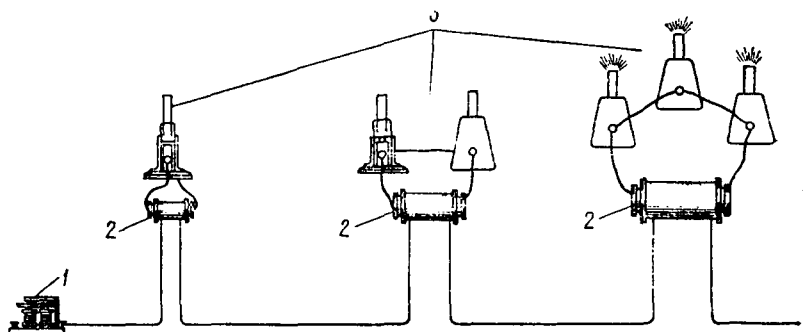


Рис. 6.2. Схема распределения электрической энергии с помощью индукционных катушек:
1 — прерыватель; 2 — индукционные катушки; 3 — электросвечи

Значительному развитию электротехники способствовала также и разработка Яблочковым нескольких весьма эффективных систем «дробления электрической энергии», обеспечивавших возможность включения в цепь, питаемую одним генератором, нескольких дуговых ламп.

Среди способов «дробления», предложенных Яблочковым, два получили практическое применение: секционирование обмотки якоря генератора (в результате получалось несколько независимых цепей, в которые включались свечи) и применение индукционных катушек (рис. 6.2). Первичные обмотки катушек включались последовательно в цепь, а во вторичную обмотку в зависимости от ее параметров могли подключаться одна, две и более свечей. Если первичная цепь питалась постоянным током, то предусматривалось включение в нее специального прерывателя для наведения э. д. с. во вторичных обмотках катушек.

Из рис. 6.2 видно, что Яблочков впервые использует индукционную катушку в качестве трансформатора с разомкнутым сердечником. Схема интересна и тем, что в ней впервые получила свое оформление электрическая сеть с ее основными элементами: первичный двигатель — генератор — линия передачи — трансформатор — приемник.

Но значение электрической свечи этим не исчерпывается. Изобретение дешевого приемника электрической энергии, доступного для широкого потребителя, потребовало решения еще одной важнейшей электротехнической проблемы — централизации производства электрической энергии и ее распределения. Яблочков первым указал на то, что электрическая энергия должна распределяться подобно тому, как доставляются к потребителям газ и вода.

Дальнейший прогресс электрического освещения был связан с изобретением лампы накаливания, которая оказалась более удобным источником света, имеющим лучшие экономические и световые

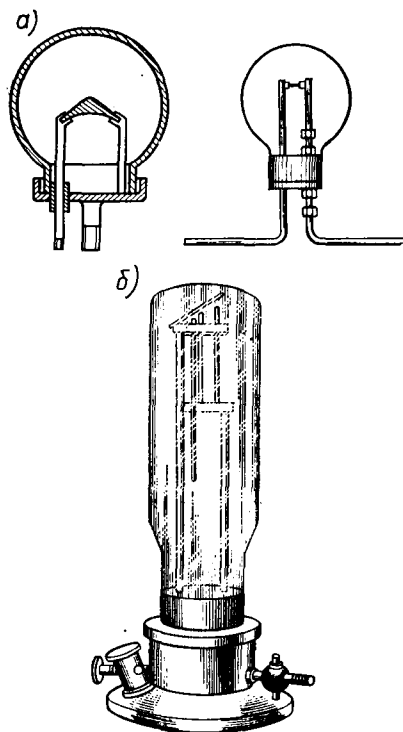


Рис. 6.3. Электрические лампы накаливания Лодыгина:

а — с одним угольным стержнем; б — с несколькими угольными стержнями разной длины; при перегорании крайнего правого стержня медная пластинка опускалась на следующий стержень и замыкала цепь

патентовал лампу накаливания с нитями из тугоплавких металлов, в том числе и с вольфрамовой нитью, прочно закрепившуюся в электроламповом производстве. С этого времени начинается быстрое развитие электрического освещения, все более расширяющееся массовое производство ламп накаливания, вызвавшее дальнейшее развитие электромашиностроительной промышленности, электроприборостроения, электроизоляционной техники и совершенствование способов производства и распределения электрической энергии.

РАЗВИТИЕ КАБЕЛЬНОЙ И ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Расширение области практического применения электроэнергии потребовало разработки электроизоляционных материалов. К 70-м годам XIX в. закладываются основы новых отраслей техники — кабельной и электроизоляционной. Начальный период развития кабельной техники тесно связан с работами по минной электротехнике и электромагнитному телеграфу. Первый подводный электриче-

показатели (в особенности после замены угольных нитей вольфрамовыми).

В 1870—1875 гг. русский электротехник А. Н. Лодыгин разработал несколько типов ламп накаливания (рис. 6.3). В первых конструкциях в качестве тела накала применялись тонкие стержни из ретортного угля, помещавшиеся в стеклянный баллон. Стремясь увеличить время горения, Лодыгин предложил устанавливать несколько угольных стерженьков, расположенных так, чтобы при сгорании одного автоматически включался следующий. Первая публичная демонстрация лампы Лодыгина состоялась в 1870 г. [42].

Эдисон, ознакомившись с лампой Лодыгина, также заинтересовался проблемой электрического освещения. В 1879 г. им была предложена достаточно хорошая конструкция вакуумной лампы с угольной нитью и винтовым цоколем (рис. 6.4). Он же разработал основные виды электроустановочных материалов, необходимых для устройства и монтажа освещения лампами накаливания.

В 1893—1894 гг. Лодыгин за-

ский кабель (Шиллинг, 1812 г.) представлял собой тонкую проволоку, покрытую двумя слоями изоляции (шелком и пенькой), причем первый слой (шелк) пропитывался специальным смолистым составом, на который затем навивалась пенька, а потом все снова пропитывалось тем же составом.

Первые подземные телеграфные кабели (Шиллинг, Якоби и др.) изготавливались так же: провода изолировались одним или двумя слоями хлопчатобумажной пряжи с последующей пропиткой ее специальными составами (например, из воска, сала и канифоли). Защитной оболочкой служили стеклянные трубки, соединенные резиновыми муфтами, или стальные гильзы; в отдельных случаях стеклянные трубки закладывались в деревянные желоба (при подземной прокладке).

В начале 40-х годов XIX в. создаются специальные машины для обивки проводов пряжей, в качестве изоляционных материалов начинают применяться резина и гуттаперча. Каучук был известен уже давно, но изменение свойств при незначительных колебаниях температуры препятствовало применению его для изоляции. Только после внедрения вулканизации (Гудйир, 1839 г.) каучук приобрел свойства резины. Для изоляции подводных телеграфных линий широко применялась гуттаперча, которая в воде хорошо сохраняла свои свойства. В начале 50-х годов впервые был получен эбонит, используемый при изготовлении различных электрических приборов и устройств.

Существенную роль в улучшении качества изоляции сыграло создание свинцового пресса (1879 г.), с помощью которого изолированный провод покрывался бесшовной свинцовой оболочкой. В 90-х годах все большее применение для силовых кабелей начинает получать многослойная пропитанная маслом бумажная изоляция.

Развитие электрических машин и аппаратов вызвало необходимость в разработке специальных термостойких электроизоляционных материалов. Для повышения термостойкости создаются пропиточные составы и покрытия, а также композиционные изолирующие материалы. Для изоляции пластин коллектора начинают применять слюду. В начале 90-х годов на основе слюды создаются новые материалы: миканит, микалента, микафоллий, нашедшие широкое применение для изоляции в электрических машинах и приборах.

В конце XIX — начале XX вв. также создаются различные синтетические высокомолекулярные соединения, на основе которых разрабатываются новые электроизоляционные материалы, которые наряду с хорошими электрическими свойствами обладают высокой термо- и влагостойкостью.

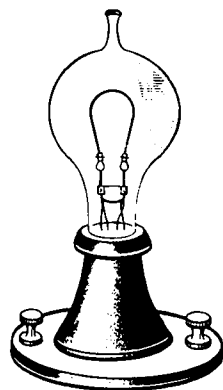


Рис. 6.4. Электрическая лампа накаливания Эдисона

РАЗВИТИЕ ГЕНЕРАТОРОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Получение переменного тока никогда не вызывало принципиальных трудностей. Описанный в гл. 5 генератор Р. М. (1832 г.) был, как отмечалось, первым многополюсным синхронным генератором, и все последующие работы в области электрических машин были направлены на изыскание наилучших конструкций коммутирующих устройств.

Так как переменный ток долгое время не находил практического применения, то попытки сконструировать соответствующие генераторы до конца 70-х годов носили эпизодический характер. Обычно такие генераторы представляли собой машины постоянного то-

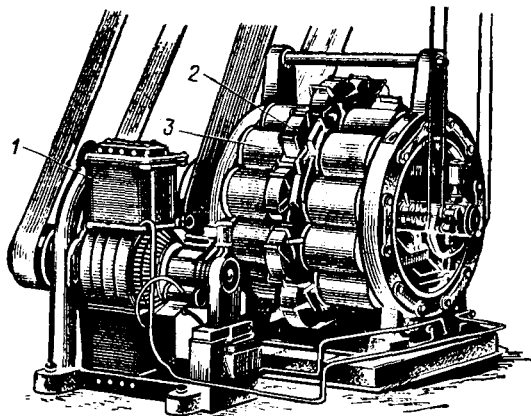


Рис. 6.5. Генератор Сименса:

1 — возбудитель; 2 — катушки ротора; 3 — катушки статора

ка, у которых коллектор заменялся двумя контактными кольцами. Так, в 1863 г. Уайльд разработал в качестве одного из вариантов машины с электромагнитами генератор переменного тока. Этот генератор внешне был очень похож на машину, описанную в гл. 5 (см. рис. 5.23), и отличался от нее лишь тем, что вместо коллектора, состоявшего из двух пластин, имел два контактных кольца. Обмотка электромагнитов питалась от отдельного магнитоэлектрического генератора, укрепленного

на ядре основной машины. В 1867 г. Уайльд построил генератор переменного тока, который не имел отдельного возбудителя.

Наиболее существенный толчок работам в области генераторов переменного тока дала электрическая свеча Яблочкова. Уже в 1878 г. Яблочков совместно с заводом Грамма разработал несколько однотипных конструкций генераторов переменного тока для питания 4, 6, 16, 20 свечей. Так, например, в генераторе на 16 свечей кольцевой неподвижный якорь имел секционированную обмотку, секции которой образовывали четыре отдельные цепи по четыре катушки в каждой цепи. На валу машины вращались восемь полюсов, возбуждавшихся постоянным током. Таким образом, на каждый полюс приходилось по две катушки, индуктировавших токи, сдвинутые по фазе друг относительно друга на четверть периода. Катушки соединялись через одну так, чтобы токи в одной цепи совпадали по фазе. От каждой цепи питались четыре свечи. Этот генератор представлял собой не что иное, как двухфазную синхронную машину с электрически не связанными фазами.

Яблочков предложил и другие конструкции генераторов переменного тока, не сыгравшие заметной роли: генератор с возвратно-поступательным движением якоря (1876 г.) и индукторные генераторы (1877 и 1881 гг.).

Серьезные трудности на пути совершенствования генераторов переменного тока возникли из-за нагрева сердечников, которые до 80-х годов не шихтовались.

Таким образом, налицо две главные тенденции, определяющие развитие генераторов переменного тока: для увеличения мощности машины увеличивать число катушек якоря (та же тенденция, что и в машинах постоянного тока в 40—50-х годах); а для снижения потерь в сердечниках (и, следовательно, их нагрева) уменьшать

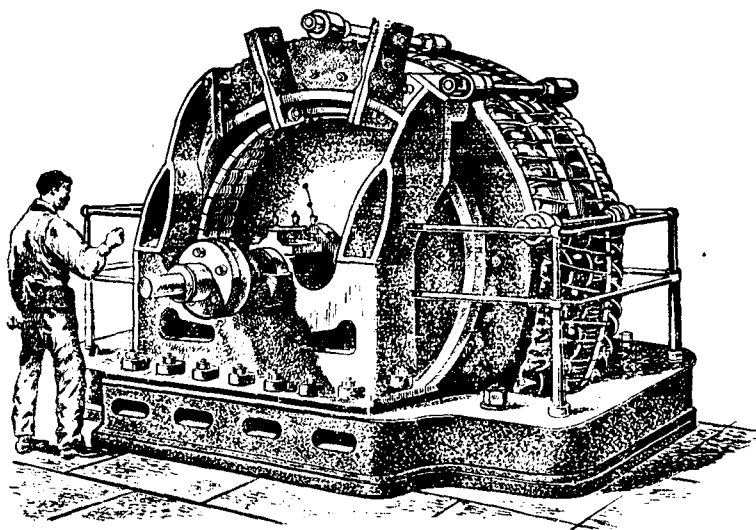


Рис. 6.6. Генератор переменного тока

объем стали в якоре (некоторые генераторы стали изготавливаться с катушками, не имевшими стальных сердечников).

Указанные тенденции можно проиллюстрировать несколькими примерами наиболее типичных машин, построенных в 80-х годах. Так, на рис. 6.5 показан генератор Сименса (1878 г.) с большим числом катушек на статоре, питаемых от отдельного возбудителя, и катушками без стальных сердечников на роторе. Катушки ротора последовательно проходили между парами катушек статора, полярность которых чередовалась. Соединение катушек ротора друг с другом было выполнено таким образом, чтобы э. д. с. их складывались. Устранение стальных сердечников, естественно, увеличило магнитное сопротивление в машине, что снижало ее эффективность.

В качестве одной из наиболее крупных для своего времени машин переменного тока можно отметить генератор английского инженера Дж. Гордона (1882 г.). Один из таких генераторов (рис. 6.6), установленных в 1885 г. на тепловой электростанции Паддингтон в Англии, был выполнен двухфазным с катушечными обмотками и предназначался так же, как и генератор Яблочкова — Грамма, для раздельного питания различных ламп. Машина имела мощность 115 кВт при напряжении 105 В и весила 18 тс; паровой двигатель сообщал ей скорость 146 об/мин. Генератор вырабатывал переменный ток с частотой 40 Гц; возбудитель приходил в движение от отдельной паровой машины.

Последний период в развитии генераторов переменного тока начинается в 90-х годах прошлого столетия, после того как началось производство трехфазных машин с шихтованными сердечниками и барабанными якорями.

Как известно, электрическая машина обратима. С этой точки зрения принципиальных трудностей для построения двигателей переменного тока не было. Уже в 1841 г. Ч. Уитстон построил синхронный электродвигатель, основанный на взаимодействии постоянных магнитов и электромагнитов переменного тока.

Из-за отсутствия начального вращающего момента пуск всех однофазных синхронных двигателей был затруднен. Такие электродвигатели нуждались в дополнительных разгонных двигателях и поэтому не могли получить широкого распространения.

Большими возможностями применения в сетях однофазного тока располагали коллекторные двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением. При питании этих двигателей переменным током направление основного магнитного потока изменялось одновременно с изменением направления тока в якоре и, следовательно, вращающий момент имел постоянное направление. М. Дери и О. Блати впервые предложили применять такие коллекторные однофазные двигатели в 1885 г. Однако широкого распространения эти двигатели тоже не нашли вследствие чрезмерного нагрева сердечников электромагнитов вихревыми токами и тяжелых условий коммутации, вызывавших сильное искрение на коллекторе. Эти недостатки несколько устранялись применением дополнительных полюсов, однако они оказались неэффективными в пусковых условиях. Поэтому коллекторный однофазный двигатель нашел весьма ограниченную область применения. В настоящее время он используется главным образом для бытового электропривода и на электрифицированных железных дорогах однофазного тока.

Еще одну попытку построить однофазный двигатель сделал американский изобретатель И. Томсон, предложивший в 1886 г. конструкцию репульсионного двигателя. Однако в связи с плохой коммутацией при скоростях, значительно отличавшихся от синхронной, такие двигатели строились только на малые мощности (до нескольких киловатт) и не получили заметного распространения.

РАЗВИТИЕ ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В развитии трансформаторов также можно выделить несколько характерных периодов.

Первый период (1830 — 1870 гг.) характеризуется развитием принципов трансформации, созданием индукционных приборов, преобразующих импульсы постоянного тока одного напряжения в импульсы тока другого напряжения. Принцип индуктивной связи двух обмоток, укрепленных на стальном сердечнике, был продемонстрирован Фарадеем (см. рис. 5.8). В конце 40-х годов и позже большое распространение получили индукционные катушки (Якоби, Румкорфа и др.), которые сыграли особенно существенную роль в качестве аппаратов системы зажигания двигателей внутреннего сгорания. Следует отметить, что в современном смысле этого слова подобные устройства нельзя назвать трансформаторами.

Второй период (середина 70-х — середина 80-х годов) характеризуется применением в сети переменного тока индукционных катушек, которые представляли собой однофазный трансформатор с разомкнутым сердечником. Первыми такими трансформаторами были индукционные катушки Яблочкова. В дальнейшем подобное применение трансформаторов с разомкнутой магнитной системой получило развитие в работах И. Ф. Усагина, Л. Голяра и Э. Д. Гиббса и др.

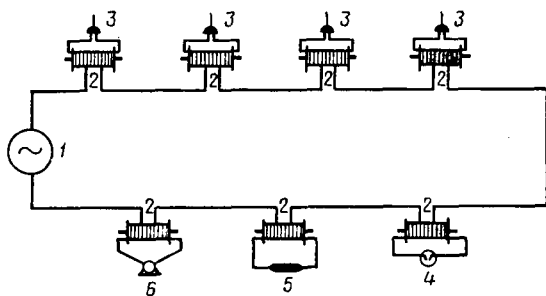


Рис. 6.7. Схема установки Усагина для питания различных приемников посредством трансформаторов:

1 — генератор; 2 — трансформаторы с разомкнутой магнитной системой; 3 — свечи Яблочкова; 4 — дуговая лампа с регулятором; 5 — проволочная нагревательная спираль; 6 — электродвигатель

В 1882 г. во время Московской промышленной выставки лаборант Московского университета И. Ф. Усагин продемонстрировал устройство, показавшее, что предложенный П. Н. Яблочковым способ распределения энергии при помощи индукционных катушек можно успешно применить для одновременного питания любого типа электрических приемников. Усагин воспользовался индукционными катушками с разомкнутой магнитной системой. В зависимости от потребителя катушки имели разные размеры, но коэффициент трансформации каждой из них был равен единице. В схеме Усагина (рис. 6.7) первичные обмотки семи катушек 2 включались последовательно в цепь однофазного переменного тока, а во вторичную обмотку включались приемники: электродвигатель, проволочная нагревательная спираль, дуговая лампа с регулятором, электрические свечи Яблочкова. Все эти приемники могли работать одновременно, не мешая друг другу. Заслуга Усагина и заключается в том, что он убедительно показал универсальность переменного тока и безопасность его использования.

Новым шагом в использовании трансформаторов с разомкнутым сердечником для распределения электроэнергии явилась «система распределения электричества для производства света и двигательной силы», запатентованная во Франции в 1882 г. Голяром и Гиббсом. Трансформаторы Голяра и Гиббса предназначались уже не только для «дробления» энергии, но и для преобразования напряжения, т. е. имели коэффициент трансформации, отличный от единицы. Общий вид «вторичного генератора» (как его называли) изображен на рис. 6.8. На деревянной подставке укреплялось несколько вертикальных индукционных катушек 1, первичные обмотки которых соединялись последовательно. Вторичные обмотки катушек были секционированы, и каждая секция имела два вывода для подключения приемников. Заслуживают внимания выдвижные

сердечники 2 катушек, с помощью которых регулировалось напряжение на вторичных обмотках.

В системах дугового освещения, как правило, регулировалась величина тока в цепи последовательно включенных потребителей. Но после изобретения ламп накаливания и других приемников, для которых важно поддерживать постоянную величину напряжения, более целесообразным стало их параллельное включение. Современные трансформаторы имеют замкнутый магнитный сердечник, их первичные обмотки включаются параллельно. Но для схемы «дробления» энергии, предложенной Яблочковым, трансформаторы с разомкнутым сердечником вполне удовлетворяли техническим

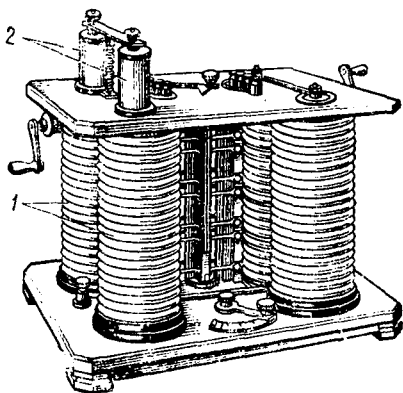


Рис. 6.8. Трансформатор Голяра и Гиббса

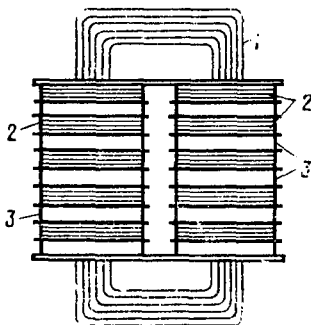


Рис. 6.9. Схема трансформатора Гопкинсон

требованиям: при последовательном соединении первичных обмоток включение и выключение одних потребителей не оказывало существенного влияния на режим работы других. При параллельном включении приемников применение трансформаторов с разомкнутыми сердечниками становилось технически не оправданным.

Поэтому понятно стремление осуществить конструкции трансформаторов с замкнутой магнитной системой, которые обладают значительно лучшими характеристиками (меньшая величина намагничивающего тока, а следовательно, меньшие потери и более высокий к. п. д.).

В течение третьего периода (от середины 80-х годов до начала становления трехфазных систем в 90-е годы) был разработан промышленный тип трансформаторов с замкнутой магнитной системой, а также предложено параллельное включение трансформаторов. Первая конструкция трансформаторов с замкнутым сердечником (рис. 6.9) была создана в Англии в 1884 г. братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсон. Сердечник 1 этого трансформатора был набран из стальных полос или проволок, разделенных изоляцион-

ным материалом, что снижало потери на вихревые токи. На сердечнике помещались, чередуясь, катушки высшего 2 и низшего 3 напряжений.

Впервые предложение о параллельном включении обмоток трансформаторов высказал Р. Кеннеди в 1883 г., но более всесторонне этот способ соединения был обоснован венгерским электротехником М. Дери, который в 1885 г. получил патент на параллельное включение первичных и вторичных обмоток трансформаторов и показал преимущество такого включения. Независимо от него аналогичный патент в Англии получил С. Ц. Ферранти. Таковы предпосылки применения трансформаторов с замкнутыми сердечниками.

Передача электрической энергии переменным током высокого напряжения оказалась возможной после создания промышленного типа однофазного трансформатора с замкнутой магнитной системой, имевшего достаточно хорошие эксплуатационные показатели. Такой трансформатор в нескольких модификациях (кольцевой, броневой и стержневой) был разработан в 1885 г. венгерскими электротехниками О. Блати, М. Дери и К. Циперновским, впервые предложившими и сам термин «трансформатор». В патентной заявке они отмечали важное значение замкнутого шихтованного сердечника, в особенности для мощных силовых трансформаторов. На рис. 6.10 изображены первые типы кольцевого и броневого трансформаторов, а также общий вид серийного трансформатора системы Блати, Дери и Циперновского, выпускавшихся электромашиностроительным заводом в Будапеште. Важное значение для расширения области применения трансформаторов и улучшения надежности их работы имело введение в конце 80-х годов масляного охлаждения (Д. Свинберн). Первые такие трансформаторы помещались в керамический сосуд, наполненный керосином или маслом.

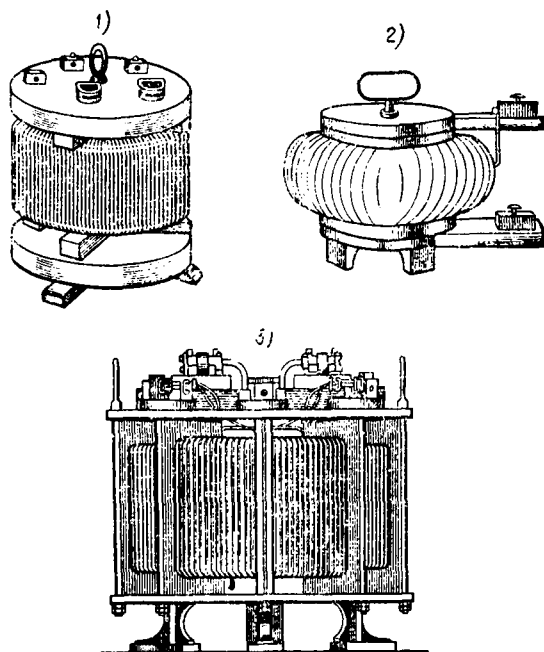


Рис. 6.10. Первые типы трансформаторов венгерских инженеров:

1 — кольцевой; 2 — броневой; 3 — серийный трансформатор будапештского завода

ВАЖНЕЙШИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Открытия в области электричества и магнетизма, сделанные в первой половине XIX в., а также широкое практическое применение этих явлений в течение 70—90-х годов явились предпосылками к важным научным обобщениям, в частности к созданию электромагнитной теории Максвелла.

Заслуга Максвелла состоит в том, что, используя накопленный до него громадный экспериментальный материал, он обобщил и развил прогрессивные идеи Фарадея, придав стройную математическую форму законам электромагнитных процессов. В своем труде «Трактат об электричестве и магнетизме» (1873 г.) Максвелл изложил основы разработанной им теории поля, являющейся краеугольным камнем современного учения об электромагнетизме. Важнейшие результаты своих исследований Максвелл сформулировал в виде известных уравнений — уравнений Максвелла. Максвелл обобщил закон электромагнитной индукции, распространив его на произвольный контур в любой среде. Он ввел понятие об электрическом смещении и токах смещения, установил принцип замкнутости тока. Одним из важнейших выводов Максвелла является утверждение о том, что магнитное и электрическое поля тесно связаны между собой и изменение одного из них вызывает появление другого. Исследования показали, что скорость распространения подобных электромагнитных возмущений совпадает со скоростью света. Этот вывод был положен в основу электромагнитной теории света, разработанной Максвеллом и являющейся одним из выдающихся теоретических обобщений естествознания.

Максвелл не дождался торжества своих глубоких научных идей и обобщений. Он сам еще не мог во всем объеме представить значение всего того, что содержалось в его «Трактате об электричестве и магнетизме», и того, что из него вытекало. Позднее немецкий физик Г. Герц экспериментально доказал существование электромагнитных волн, а русский физик П. Н. Лебедев открыл световое давление и определил из опытов его величину, совпадающую со значениями, вычисленными по теории Максвелла.

Важное значение в развитии представлений о движении энергии имели работы проф. Н. А. Умова, среди которых особого внимания заслуживает его докторская диссертация «Уравнения движения энергии в телах» (1874 г.). Идеи Умова получили дальнейшее развитие, в частности, в трудах английского физика Дж. Г. Пойнтинга применительно к электромагнитному полю (1884 г.).

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

Проблема передачи энергии на расстояние возникла задолго до того, как были построены первые электростанции. Но особенно актуальной она стала в связи с возникновением крупных промышленных предприятий, на которых приводилось в действие несколько исполнительных механизмов от одного двигателя.

Раньше всего возникли способы механической передачи (штанги, тяги и канаты), а затем получили распространение различные способы передачи механической энергии посредством систем приводных ремней и канатов (передачи с гибкой связью). Следует отметить, что трансмиссионная передача даже сегодня еще не вполне отмерла.

Опыты использования электромагнитного телеграфа неизбежно привели к мыслям о возможности передачи по проводам более значительных количеств энергии. Уже в 40—50-х гг. XIX в. в США, Италии и других странах высказываются идеи о создании электри-

ческой железной дороги с передачей энергии на расстояние. Однако всеобщую известность получили опыты французского электрика И. Фонтена.

Здесь уместно отметить, что международные и национальные выставки сыграли исключительно большую роль в пропаганде научно-технических знаний и, следовательно, в научно-техническом прогрессе общества. Первая промышленно-художественная выставка состоялась в Лондоне в 1756 г. Основное место на ней занимали вестники промышленного переворота — текстильные машины. В России первая выставка отечественной промышленности была открыта в 1829 г. в Петербурге. Первая в мире электротехническая выставка была открыта в марте 1880 г. в Петербурге, а первая международная электротехническая выставка — в 1881 г. в Париже.

В 1873 г. в Вене состоялась международная выставка, с которой и начинается история электропередачи. На Венской международной выставке Фонтен демонстрировал обратимость электрических машин. Есть различные версии, объясняющие причину, побудившую Фонтена включить между генератором и двигателем барабан с кабелем длиной несколько больше 1 км. По одной из них он стремился уменьшить мощность двигателя, приводившего в действие насос искусственного декоративного водоппада, вода которого выплескивалась за пределы бассейна. Этим опытом была продемонстрирована реальная возможность передачи электроэнергии на расстояние (пусть вначале это был всего один километр). Вместе с тем сам Фонтен не был убежден в экономической целесообразности электропередачи, так как при включении соединительного кабеля он получил значительное снижение мощности двигателя, т. е. большие потери энергии в кабеле.

Из закона Джоуля — Ленца известно, что потери в проводах

$$\Delta P = rI^2 = P^2 \rho l / U^2 q,$$

где I — ток в проводе; r — сопротивление провода; P — мощность, передаваемая по линии; ρ — удельное сопротивление провода; l — длина провода; q — сечение провода; U — напряжение.

Очевидно, что потери в линии зависят от напряжения, удельного сопротивления провода и его сечения. Снижение удельного сопротивления проводов практически неосуществимо, так как медь, ставшая основным материалом для изготовления проводов, имеет предельно малое удельное сопротивление. Лишь в настоящее время ведутся теоретические и экспериментальные работы по снижению сопротивления линий электропередач с использованием явления сверхпроводимости (криогенные линии электропередачи). Следовательно, имелись только два пути для снижения потерь в линии: увеличение сечения проводов или повышение напряжения.

В 70-х годах был исследован первый путь, так как увеличение сечения проводников представлялось мероприятием, по-видимому, более естественным и технически легче осуществимым по сравнению с повышением напряжения. В 1874 г. русский военный инженер

Ф. А. Пироцкий пришел к выводу об экономической целесообразности производства электрической энергии в тех местах, где она может быть дешево получена благодаря наличию топлива или гидравлической энергии и передачи ее по линии к более или менее отдаленному месту потребления. В том же году он приступил к опытам передачи энергии на артиллерийском полигоне Волкова поля (около Петербурга), используя электрическую машину Грамма. Дальность передачи в опытах Пироцкого составляла сначала более 200 м, а затем была увеличена примерно до 1 км.

Для уменьшения потерь в линии Пироцкий предлагал использовать в качестве проводников железнодорожные рельсы, сечение которых более чем в 600 раз превышало сечение обыкновенного телеграфного провода. Стремясь проверить свои выводы, он в конце 1875 г. провел опыты передачи электроэнергии по рельсам бездействовавшей ветки Сестрорецкой железной дороги длиной около 3,5 км. Оба рельса изолировались от земли, один из них служил прямым, второй — обратным проводом. Электрическая энергия передавалась от небольшого генератора Грамма к электродвигателю, удаленному на расстояние около 1 км.

Необходимо отметить, что Пироцкий был не единственным электротехником, ставшим на путь увеличения сечения проводов. Так, например, В. Сименс, посетив в 1876 г. Ниагарский водопад, сумел правильно оценить энергетические возможности его использования, но утверждал, что для передачи энергии водопада на расстояние 50 км потребуются проводник диаметром 75 мм. Подобные выводы являлись наглядным выражением уровня познаний в области электротехники в 70-х годах XIX в.

Несмотря на нерациональность практического направления, избранного Пироцким, его опыты привлекли внимание к вопросам электропередачи вообще и вызвали ряд новых исследований, приведших к выявлению правильного пути для решения этой проблемы. Предложение Пироцкого об использовании железнодорожных рельсов для передачи электрической энергии на расстояние нашло свое применение уже при разработке первых проектов городских электрических железных дорог.

Другой путь решения проблемы передачи электрической энергии, основанный на повышении напряжения, длительное время осмысливался теоретически. Здесь можно упомянуть исследование классической задачи из теории цепей о передаче энергии от источника к нагрузке, выполненное в 1877 г. французским академиком Э. Маскаром, но не доведенное до ясных практических выводов. Наиболее обстоятельное исследование этого вопроса выполнили в 1880 г. независимо друг от друга французский инженер (впоследствии академик) Марсель Депре и профессор физики Петербургского лесного института Д. А. Лачинов.

В марте 1880 г. в протоколах Парижской академии наук был опубликован доклад М. Депре «О коэффициенте полезного действия электрических двигателей и об измерении количества энергии в электрической цепи», в котором он математически доказывал, что

к. п. д. установки, состоявшей из электродвигателя и линии передачи, не зависит от сопротивления самой линии. Такой вывод показался Депре парадоксальным, так как ему вначале не удалось установить, что увеличение сопротивления линии не влияет на эффективность электропередачи только при определенном условии, а именно — при увеличении напряжения передачи.

Эти условия впервые были указаны проф. Д. А. Лачиновым в статье «Электромеханическая работа», опубликованной в июне 1880 г. в первом номере журнала «Электричество». На основе математических выкладок Лачинов показал, что в электропередаче «полезное действие не зависит от расстояния» лишь при условии увеличения скорости вращения генератора (т. е. при повышении напряжения в линии, так как э. д. с., развиваемая генератором, пропорциональна скорости, — *Авт.*). Лачинов также установил количественное соотношение между параметрами линии передачи, доказав, что для сохранения к. п. д. передачи при увеличении сопротивления линии в n раз необходимо увеличить скорость вращения генератора в $\sqrt{n}$ раз: «Если, например, — писал Лачинов, — увеличим R в 100 раз, то при передаче того же числа лошадиных сил скорость будет десятикратная». К подобным же выводам пришел более чем год спустя и М. Депре.

В 1882 г. Депре строит первую линию электропередачи Мисбах — Мюнхен протяженностью 57 км. На одном конце опытной линии в Мисбахе была установлена паровая машина, приводившая в действие генератор постоянного тока мощностью 3 л. с., дававший ток напряжением 1,5—2 кВ (рис. 6.11). Энергия передавалась по стальным телеграфным проводам диаметром 4,5 мм на территорию выставки в Мюнхене, где была установлена такая же машина, работавшая в режиме электродвигателя и приводившая в действие насос для искусственного водопада. Хотя этот первый опыт и не дал достаточно благоприятных технических результатов (к. п. д. передачи не превосходил 25%), его значение нельзя было недооценивать: электропередача Мисбах — Мюнхен явилась отправным пунктом для дальнейших работ по развитию методов и средств передачи электроэнергии на расстояние.

Обратим внимание на любопытный факт. Теория телеграфных линий была разработана достаточно хорошо и было известно, что наибольший эффект в работе приемного устройства достигается тогда, когда его сопротивление вместе с сопротивлением соединительных проводов равно внутреннему сопротивлению источника энергии (согласованный режим). Но при этом к. п. д. всей установки составляет 50%. Иными словами, режим передачи наибольшей мощности от источника к нагрузке соответствует коэффициенту полезного действия лишь 0,5.

Но то, что целесообразно для «слаботочной» техники, становится нецелесообразным для «сильноточной», т. е. энергетической техники. В последнем случае важен экономический эффект, и к. п. д. следует всемерно повышать даже в ущерб количеству передаваемой энергии. Это обстоятельство длительное время оказыва-

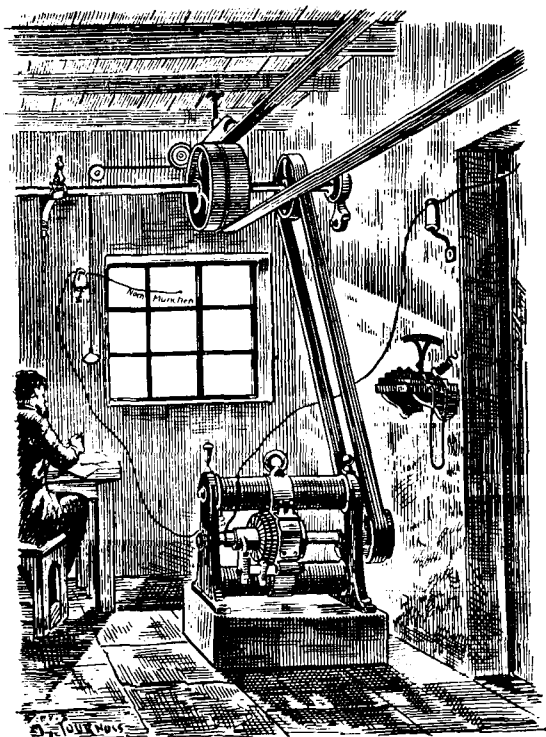


Рис. 6.11. Установка в Мисбахе

лось труднодоступным для понимания, и многие даже крупные специалисты (в том числе Фонтен, позднее Феррарис и др.) теряли перспективу в научно-технических поисках и порой прекращали работу лишь потому, что не могли освободиться от привычных рамок теории слаботочных цепей.

Высокую оценку работам Дебре дали Маркс и Энгельс. Уже в этой начальной стадии они усмотрели не только зародыш будущего освобождения промышленности «почти от всех местных границ» и возможность использования даже самых отдаленных гидравлических ресурсов, но и указали на важные социальные последствия решения

задачи передачи энергии. В письме к Бернштейну (1883 г.) именно работы Дебре имел в виду Энгельс, когда писал, что благодаря этому производительные силы настолько вырастут, что управление ими будет все более и более не под силу буржуазии.

В 1885 г. были произведены опыты еще в большем масштабе — на расстоянии 56 км между Крейлем и Парижем. В качестве генераторов постоянного тока высокого напряжения использовались специально построенные машины, дававшие напряжение до 6 кВ. Вес такой машины был около 70 тс, мощность — около 50 л. с., к. п. д. около 45%.

Наряду с установками для передачи электрической энергии на расстояние в эти годы были осуществлены единичные установки передачи электроэнергии для промышленного использования (с к. п. д. до 75%).

Тем не менее, попытки решить проблему электропередачи на постоянном токе, осуществленные в 80-х годах, не принесли желаемых результатов. При этом важно подчеркнуть возникшее противоречие. С одной стороны, практика проектирования и производства электрических машин и аппаратов постоянного тока получила

уже значительное развитие, двигатели постоянного тока обладали хорошими рабочими характеристиками, отвечавшими большинству требований промышленности. С этой точки зрения не было серьезных препятствий к тому, чтобы приступить к широкой электрификации силового аппарата промышленности. Но, с другой стороны, широкая электрификация промышленности может быть осуществлена в больших масштабах только при централизованном производстве электроэнергии, а следовательно, только при обеспечении передачи электроэнергии на значительные расстояния.

Однако для передачи энергии требовалось получить высокие напряжения, а технические возможности того времени не позволяли строить генераторы постоянного высокого напряжения; примером этого могут служить машины Депре, которые часто выходили из строя из-за порчи изоляции. Вообще говоря, в любом случае передача энергии при напряжении генератора ограничена сравнительно низкими пределами. Кроме того, электроэнергию постоянного высокого напряжения не представлялось возможным легко использовать потребителем: нужно было строить двигатель — генераторную установку для преобразования высокого напряжения в низкое.

Еще один путь использования постоянного тока для электропередачи был намечен в основополагающей работе Д. А. Лачинова. Он предлагал для повышения напряжения соединить последовательно по несколько машин на каждом конце линии. В этом случае каждая в отдельности машина могла быть рассчитана на более низкое напряжение, а следовательно, могла быть более надежной. Фонтен первым реализовал практически эту идею, осуществив в 1886 г. передачу, в которой со стороны генератора работали 4 последовательно соединенные машины (по 1500 В), т. е. получил те же 6 кВ, что и у Депре, а со стороны приемника — 3 двигателя на суммарную мощность около 50 л. с. Двигатели могли использоваться непосредственно для привода исполнительных механизмов, могли вращать валы генераторов низкого напряжения, пригодного для целей освещения. К. п. д. этой установки Фонтена достигал 52%. Позднее эта идея о последовательном включении генераторов была развита в электропередачах по системе Р. Тюри.

Трудности, связанные с электропередачей на постоянном токе, направили мысли ученых на разработку техники и теории переменного тока.

Когда основные элементы техники переменного тока (генераторы, трансформаторы) были разработаны, начались попытки осуществить промышленную передачу энергии на переменном токе. В 1883 г. Л. Голяр осуществил передачу мощности 20 л. с. на расстояние 23 км для питания осветительных установок Лондонского метрополитена. Трансформаторы повышали напряжение до 1500 В. На Туринской выставке в следующем году Голяр осуществил передачу на 40 км при напряжении 2000 В (мощность примерно 40 л. с.).

Однако во второй половине 80-х годов уже возникла задача включения в сеть электростанций силовой нагрузки. Таким образом, и при передаче электроэнергии однофазным переменным током

снова возникло противоречие не менее серьезное, чем при электропередаче постоянным током. Напряжение однофазного переменного тока можно легко повысить и понизить с помощью трансформаторов практически в любых желаемых пределах. Следовательно, для передачи электроэнергии затруднений не было. Но однофазные двигатели переменного тока имели совершенно неприемлемые для целей практики характеристики; в частности, они, как было показано, либо вообще не имели пускового момента (синхронные двигатели), либо пускались с очень большим трудом из-за тяжелых условий коммутации тока (коллекторные двигатели). Поэтому сфера применения однофазного тока должна была ограничиваться почти исключительно электрическим освещением, что, конечно, не могло удовлетворить требования промышленности.

ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПОСТОЯННОГО И ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Электростанции, под которыми понимают фабрики по производству электрической энергии, подлежащей распределению между различными потребителями, появились не сразу. В 70-х и начале 80-х годов прошлого столетия процесс производства электроэнергии не был отделен от процесса потребления.

Электрические станции, обеспечивавшие электроэнергией ограниченное число потребителей, назывались блок-станциями (не путать с современным понятием блок-станций, под которым некоторые авторы понимают фабрично-заводские теплоэлектроцентрали). Такие станции иногда называли «домовыми».

В связи с трудностями регулировки системы дугового освещения на первых порах строились специализированные блок-станции: одни для дуговых ламп, другие — для ламп накаливания. Иногда на одной и той же станции генераторы разделяли на две соответствующие группы. Развитие первых электростанций было сопряжено с преодолением трудностей не только научно-технического, но и волюнтаристского и конъюнктурного характера. Так, городские власти запрещали сооружение воздушных линий, опасаясь причинить вред внешнему виду города и горожанам. Конкурирующие газовые компании всячески подчеркивали действительные и мнимые недостатки нового рода освещения.

На электрических блок-станциях, строившихся в конце 70-х и в начале 80-х годов прошлого столетия, в качестве первичных двигателей применялись в основном поршневые паровые машины; в отдельных случаях использовались двигатели внутреннего сгорания, в то время являвшиеся новинкой. Для удешевления паросиловой части блок-станций широко применялись локомобили. От первичного двигателя к электрическому генератору делалась ременная передача, позволявшая приводить в движение быстроходные электрические генераторы от сравнительно тихоходных паровых машин, имевших скорость не более 200 об/мин. Обычно один паровой двигатель приводил в действие 1—3 генератора; поэтому

на крупных блок-станциях того времени устанавливались несколько паровых машин или локомотивов. Для регулировки натяжения ремней электрические генераторы монтировались на салазках. На рис. 6.12 показан вид «домовой» электростанции.

Впервые блок-станции были построены в Париже для питания свечей Яблочкова, установленных на улице Оперы. В России первой установкой такого рода явилась станция для освещения Литейного моста в Петербурге, созданная в 1879 г. при участии П. Н. Яблочкова. С конца 1881 г. возникают блок-станции, в сети которых включались как дуговые лампы, так и лампы накаливания.

Однако идея централизованного производства электроэнергии была настолько экономически оправданной и настолько соответствовала тенденции концентрации промышленного производства, что первые центральные электростанции возникли уже в середине 80-х годов и быстро вытеснили блок-станции. В связи с тем, что в начале 80-х годов массовыми потребителями электроэнергии могли стать только источники света, первые центральные электростанции проектировались, как правило, для питания осветительной нагрузки и вырабатывали постоянный ток.

В 1881 г. несколько предприимчивых американских финансистов под впечатлением успеха, которым сопровождалась демонстрация ламп накаливания, заключили соглашение с Эдисоном и приступили к сооружению первой в мире центральной электростанции (на Пирльстрит в Нью-Йорке). В сентябре 1882 г. эта электростанция была сдана в эксплуатацию (рис. 6.13). В машинном зале станции (рис. 6.14) было установлено шесть генераторов Эдисона. Мощность каждого генератора составляла около 90 кВт, а общая мощность электростанции превышала 500 кВт. Здание станции



Рис. 6.12. «Блок-станция» — электростанция с двумя генераторами (внизу справа) и локомотивом (слева) для освещения одного дома

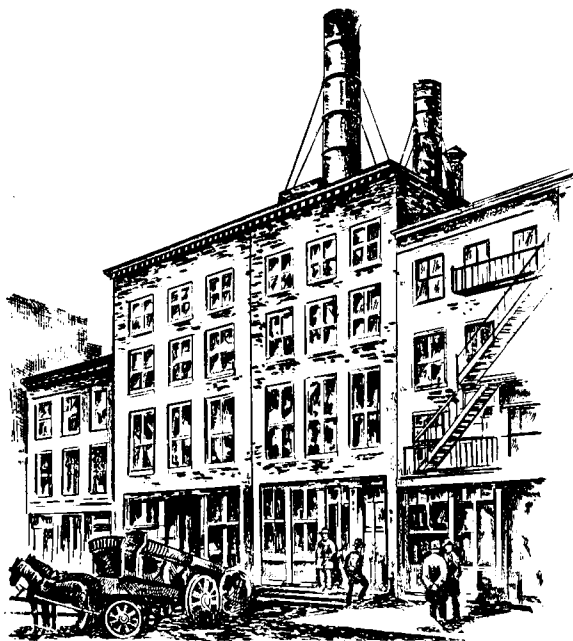


Рис. 6.13. Внешний вид первой центральной электростанции (Нью-Йорк)

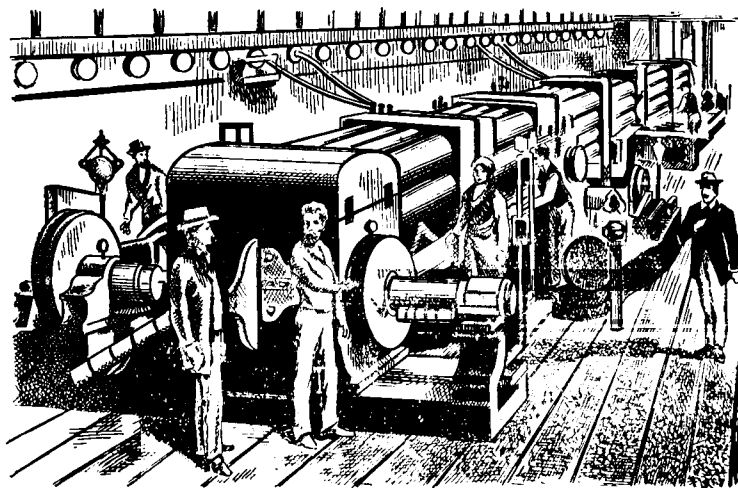


Рис. 6.14. Машинный зал первой центральной электростанции

и ее оборудование были спроектированы весьма целесообразно, так что в дальнейшем при строительстве новых электростанций развивались многие из тех принципов, которые были предложены Эдисоном. Так, генераторы станции имели искусственное охлаждение и соединялись непосредственно с двигателем. Напряжение регулировалось автоматически. На станции осуществлялись механическая подача топлива в котельную и автоматическое удаление золы и шлака. Защита оборудования от токов короткого замыкания осуществлялась плавкими предохранителями, а магистральные линии были кабельными. Станция снабжала электроэнергией обширный по тому времени район площадью 2,5 км². Вскоре в Нью-Йорке было построено еще несколько станций.

Исходная величина напряжения первых электростанций, от которой впоследствии были произведены другие, образующие известную шкалу напряжений, сложилась исторически. Дело в том, что в период исключительного распространения дугового электрического освещения эмпирически было установлено, что наиболее подходящим для горения дуги является напряжение 45 В. Чтобы уменьшить токи короткого замыкания, которые возникали в момент зажигания ламп (при соприкосновении углей), и для более устойчивого горения дуги включали последовательно с дуговой лампой балластный резистор. Так же эмпирически было найдено, что величина сопротивления балластного резистора должна быть такой, чтобы падение напряжения на нем при нормальной работе составляло примерно 20 В. Таким образом, общее напряжение в установках постоянного тока сначала составляло 65 В, и эта величина долгое время применялась. Однако часто в одну цепь включали последовательно две дуговые лампы, для работы которых требовалось $2 \cdot 45 = 90$ В, а если к этой величине прибавить еще 20 В, приходящиеся на сопротивление балластного резистора, то получится напряжение 110 В. Это напряжение почти повсеместно было принято в качестве стандартного, и именно оно открывает современную шкалу напряжений, хотя причина выбора этой величины давно забыта.

Уже при проектировании первых центральных электростанций столкнулись с трудностями, которые в достаточной степени не были преодолены в течение всего периода господства техники постоянного тока. Радиус электроснабжения определялся величиной допустимых потерь напряжения в электрической сети, которые для данной сети тем меньше, чем выше напряжение. Именно эти обстоятельства заставляли строить электростанции в центральных частях города, что существенно затрудняло не только обеспечение водой и топливом, но и удорожало стоимость земельных участков для строительства станций, так как земля в центре города была чрезвычайно дорога. Этим, в частности, объясняется необычный вид нью-йоркских станций, на которых оборудование располагалось на многих этажах. Положение осложнялось еще и тем, что на первых электростанциях приходилось размещать большое количество котлов, паропроизводительность которых не соответствовала новым требованиям, предъявляемым электроэнергетикой.

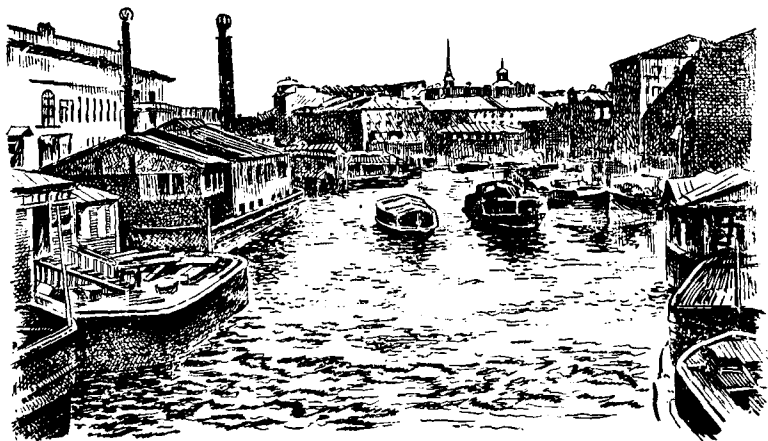


Рис. 6.15. Электростанция на реке Фонтанке в Петербурге

Не менее удивился бы наш современник, увидев первые петербургские электростанции, которые обслуживали район Невского проспекта. В начале 80-х годов они размещались на баржах, закрепленных у причалов на реках Мойке и Фонтанке (рис. 6.15). Строители исходили из соображений дешевого водоснабжения, кроме того, при таком решении не нужно было покупать земельные участки, близкие к потребителю.

В 1886 г. в Петербурге было учреждено акционерное «Общество электрического освещения 1886 г.» (сокращенно называлось «Общество 1886 г.»), которое приобрело станции на реках Мойке и Фонтанке и построило еще две: у Казанского собора и на Инженерной площади. Мощность каждой из этих станций едва превышала 200 кВт.

В Москве первая центральная электростанция (Георгиевская) была построена в 1888 г. тоже в центре города, на углу Большой Дмитровки (ныне Пушкинская ул.) и Георгиевского переулка. Ее энергия использовалась для освещения прилегающего района. Мощность станции составляла 400 кВт.

Ограниченные возможности расширения радиуса электроснабжения привели к тому, что удовлетворить спрос на электроэнергию со временем становилось все труднее. Так, в Петербурге и Москве к середине 90-х годов возможности присоединения новой нагрузки к существующим станциям были исчерпаны и встал вопрос об изменении схем сети или даже об изменении рода тока.

На центральных станциях с ростом их мощности локомотивы, применявшиеся в качестве первичных двигателей блок-станций, постепенно вытеснялись стационарными машинами. Мощность этих машин составляла 100—300 л. с., скорость вращения вала была относительно невелика (100—200 об/мин), что привело к необходимости ввести между машиной и генератором ременную или ка-

натную передачу. Давление пара не превосходило 10 кгс/см², перегрев чаще всего отсутствовал.

В котельных ранних тепловых электростанций устанавливались жаротрубные котлы, однако вскоре в связи с ростом мощности потребовались котлы более высокой паропроизводительности: водотрубные паровые. В конце XIX и начале XX вв. преимущественное распространение в котельных зарубежных электростанций получили котлы Бабкок-Вилькоккс, а в России — котлы системы Шухова.

Основным топливом котельных с ручной загрузкой служил уголь, сжигавшийся на плоских колосниках. Расход угля при таком способе сжигания и отсутствии экономайзеров, подогрева воздуха и плохой изоляции в 3—4 раза превышал расходы современных станций.

Рост потребностей в электроэнергии эффективно стимулировал повышение производительности и экономичности тепловой части электрических станций. Прежде всего следует отметить решительный поворот от поршневых паровых машин к паровым турбинам. Первая паровая турбина на электростанциях России была установлена в 1891 г. в Петербурге (станция на реке Фонтанке). За год до этого испытание турбины было проведено на станции, расположенной на реке Мойке.

В рассматриваемый период гидроэлектростанции строились редко в связи с трудностями передачи электроэнергии на большие расстояния.

Выше уже отмечался наиболее существенный недостаток электроснабжения постоянным током: слишком малый радиус района, который может обслуживаться центральной электростанцией. Обычно он составлял несколько сотен метров. Электростанции — капиталистические предприятия — стремились расширить круг потребителей своего товара — электроэнергии. Этим объясняются настоячивые поиски путей увеличения радиуса электроснабжения при условии сохранения уже построенных станций постоянного тока. Было найдено несколько путей увеличения радиуса распределения энергии.

Первая идея, не получившая заметного распространения, касалась понижения напряжения электрических ламп, подключавшихся в конце линии. Однако расчеты показали, что при протяженности сети более 1,5 км экономически выгодней было построить новую электростанцию.

Другое решение, которое могло во многих случаях удовлетворить потребность, состояло в изменении схемы сети: переход от двухпроводных сетей к многопроводным, т. е. фактически к повышению напряжения.

Трехпроводная система распределения электроэнергии была предложена в 1882 г. Дж. Гопкинсоном и независимо от него Т. Эдисоном. При этой системе генераторы на электростанции соединялись последовательно и от средней точки шел нейтральный или компенсационный провод. При этом обычные лампы сохранялись. Они включались, как правило, между рабочими проводами и

нейтральным, а двигатели для сохранения симметрии нагрузки можно было включать на повышенное напряжение (220 В). Если нагрузка в обеих ветвях трехпроводной системы была одинаковой, то в нейтральном проводе тока не было. В других случаях в нейтральном проводе появлялся ток, который обычно был много меньше рабочего тока. Последнее обстоятельство позволяло выбирать сечение нейтрального провода меньшим (обычно $1/2$ или $1/3$ сечения крайнего провода). Не следует упускать из виду, что сечение крайних проводов при этом тоже уменьшалось по сравнению с сечением проводов в двухпроводной системе. Это объяснялось тем, что при увеличении напряжения вдвое ток при той же мощности вдвое уменьшается, а потери, пропорциональные квадрату тока, снижались вчетверо. Практическими результатами введения трехпроводной системы явилось, во-первых, увеличение радиуса электроснабжения примерно до 1200 м, во-вторых, относительная экономия меди для проводов (при всех прочих одинаковых условиях расход меди при трехпроводной системе был практически вдвое меньше, чем при двухпроводной).

Для регулирования напряжения в ветвях трехпроводной сети применялись различные устройства: регулировочные дополнительные генераторы, делители напряжения, в частности, получившие значительное распространение делители напряжения Доливо-Добровольского, аккумуляторные батареи. Трехпроводная система широко применялась как в России, так и за рубежом. Она сохранилась вплоть до 20-х годов нашего века, а в отдельных случаях применялась и позднее.

Максимальный вариант многопроводных систем — пятипроводная сеть постоянного тока, в которой применялись четыре последовательно включенных генератора и напряжение увеличивалось вчетверо. Экономия меди была весьма большой, а радиус электроснабжения возрастал до 1500 м. Однако сравнительно незначительное увеличение радиуса электроснабжения достигалось в этом случае за счет существенного усложнения сети, повышения напряжения до опасных пределов, усложнения регулирования равномерности нагрузки отдельных ветвей. Поэтому пятипроводная система не получила широкого применения, хотя ее автор В. Сименс предполагал, что пятипроводная система будет с успехом конкурировать с системами переменного тока.

Третий путь увеличения радиуса электроснабжения предполагал сооружение аккумуляторных подстанций. Аккумуляторные батареи были в то время обязательным дополнением каждой электростанции. Они покрывали пики нагрузок. Заряжаясь в дневные и поздние ночные часы, они служили резервом. Аккумуляторные батареи так же, как и на современных электростанциях (где, впрочем, эти батареи выполняют иные функции — питание цепей управления, защиты, автоматики и аварийного освещения), размещались в специальных обширных помещениях.

Для увеличения радиуса электроснабжения аккумуляторные батареи устанавливались на подстанциях в двухпроводных сетях

постоянного тока. Эти подстанции сооружались вблизи отдельных потребителей. Группы аккумуляторных батарей, соединенные последовательно, заряжались от центральной станции при двойном напряжении, а при параллельном соединении они питали местную нагрузку.

Сети с аккумуляторными подстанциями получили некоторое распространение. В Москве, например, была построена в 1892 г. аккумуляторная подстанция в Верхних торговых рядах (ныне ГУМ), находившаяся на расстоянии 1385 м от Георгиевской центральной станции. На этой подстанции были установлены аккумуляторы, питавшие около 2000 ламп накаливания.

В последние два десятилетия прошлого века было построено много электростанций постоянного тока, и они долгое время давали значительную долю общей выработки электроэнергии. Мощность таких электростанций редко превышала 500 кВт, агрегаты обычно имели мощность до 100 кВт.

Все возможности увеличения радиуса электроснабжения при постоянном токе довольно быстро были исчерпаны. Многопроводные сети и сети с аккумуляторными подстанциями могли еще удовлетворять потребности малых и средних городов, но совершенно не отвечали нуждам крупного города.

В 80-х годах начинают сооружаться станции переменного тока, выгодность которых с точки зрения увеличения радиуса электроснабжения была бесспорной. Если не считать блок-станций переменного тока, построенных в Англии в 1882—1883 гг., когда появились трансформаторы Голяра и Гиббса, то, по-видимому, первой постоянно действовавшей электростанцией переменного тока можно считать станцию Гровнерской галереи (Лондон). На этой станции, пущенной в эксплуатацию в 1884 г., были установлены два генератора переменного тока Сименса, которые через последовательно включенные трансформаторы Голяра и Гиббса работали на освещение галереи. Недостатки последовательного включения трансформаторов и, в частности, трудности поддержания постоянства величины тока были выявлены довольно быстро, и в 1886 г. эта станция была реконструирована по проекту С. Ц. Ферранти. Генераторы Сименса были заменены машинами конструкции Ферранти каждая мощностью 1000 кВт с напряжением на зажимах 2,5 кВ. Трансформаторы, изготовленные по проекту Ферранти, включались в цепь параллельно и служили для снижения напряжения в непосредственной близости от потребителей.

В 1889—1890 гг. Ферранти вновь вернулся к проблеме электроснабжения Лондона. На этот раз была поставлена задача обеспечить электроэнергией весь район лондонского Сити. Но поскольку компания, финансирувавшая работы, не соглашалась оплатить высокую стоимость земельного участка в центре города, Ферранти выбрал место для новой центральной электростанции в одном из предместий Лондона, в Дептфорде, находящемся в 12 км от Сити. Построить электростанцию на таком большом расстоянии от места потребления электроэнергии можно было только при условии, что

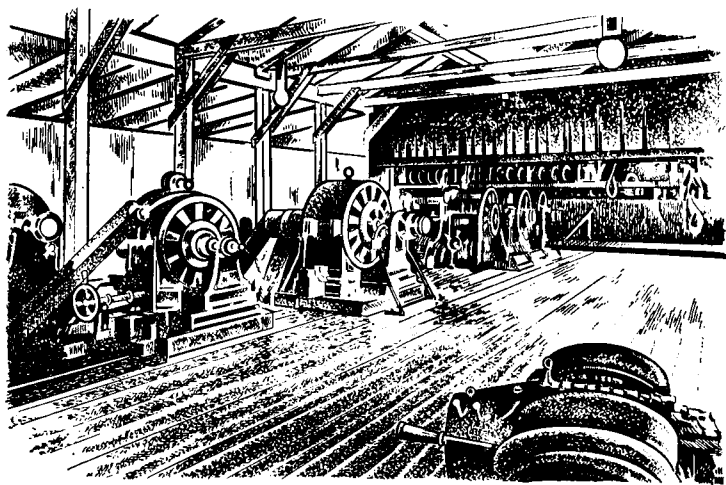


Рис. 6.16. Машинный зал гидроэлектростанции однофазного тока в Портленде

она будет вырабатывать переменный ток. При сооружении этой установки были применены мощные по тому времени машины высокого напряжения. Были установлены генераторы мощностью по 1000 л. с. с напряжением 10 кВ, причем в отличие от старых генераторов, которые приводились в движение от паровой машины при помощи канатной передачи, новые генераторы были непосредственно соединены с быстроходными вертикальными паровыми машинами*. Быстроходность паровых поршневых двигателей все же сильно отставала от быстроходности электрогенераторов. Этим, в частности, объясняется своеобразная конструкция электрических генераторов того времени: они имели большие диаметры и малые длины. Такие же в общем соотношения между диаметром и длиной машины сохранились и в настоящее время на гидростанциях с относительно тихоходными водяными турбинами в качестве первичного двигателя. Общая мощность Дептфордской станции составляла около 3000 кВт. На четырех городских подстанциях, питавшихся по четырем магистральным кабельным линиям, напряжение понижалось до 2400 В, а затем уже у потребителей (в домах) напряжение понижалось до 100 В.

Примером крупной гидроэлектростанции однофазного тока, питавшей осветительную нагрузку, может служить американская станция, построенная в 1889 г. на водопаде вблизи Портленда (США). На этой станции (рис. 6.16) гидравлические двигатели приводили в действие восемь однофазных генераторов общей мощностью 720 кВт.

* То же самое сделал, как указывалось выше, Т. Эдисон еще в 1882 г. Но в дальнейшем желание увеличить скорость генераторов, а при переменном токе и двигателей, заставляло нередко вновь возвращаться к менее надежной ременной или канатной передаче.

Кроме того, на станции были установлены 11 генераторов, предназначенных специально для питания дуговых ламп (по 100 ламп на каждый генератор). Энергия этой станции передавалась на расстояние 14 миль в Портленд.

Характерная особенность первых электростанций переменного тока — изолированная работа отдельных машин. Синхронизация генераторов еще не производилась, и от каждой машины шла отдельная цепь к потребителям. Легко понять, насколько неэкономичными при таких условиях оказывались электрические сети, на сооружение которых расходовались колоссальные количества меди и изоляторов.

В России крупнейшие станции однофазного тока были сооружены в конце 80-х и начале 90-х годов. Первая центральная электростанция была построена венгерской фирмой «Ганц и К^о» в Одессе в 1887 г. Основным потребителем энергии была система электрического освещения нового театра. Эта электростанция представляла собой прогрессивное для своего времени сооружение. Она имела 4 водотрубных котла общей производительностью 5 т пара в час при давлении 10 ат; два синхронных генератора общей мощностью 160 кВт при напряжении на зажимах 2 кВ и частоте 50 Гц. От распределительного щита энергия поступала в линию длиной 2,5 км, ведущую к трансформаторной подстанции театра, где напряжение понижалось до 56 В (на которое были рассчитаны лампы накаливания). Оборудование электростанции было столь совершенным для своего времени, что, несмотря на то, что топливом служил привозной английский уголь, стоимость электроэнергии была ниже, чем на более поздних петербургских и московских электростанциях. Расход топлива составлял 3,4 кг/кВт·ч (на петербургских электростанциях — 3,9—5,4 кг/кВт·ч).

В том же году началась эксплуатация электростанции постоянного тока в Царском Селе (ныне г. Пушкин). Протяженность воздушной сети в Царском Селе уже в 1887 г. была около 64 км, тогда как 2 года спустя кабельная сеть «Общества 1886 г.» в Москве и Петербурге, вместе взятых, составляла только 115 км. В 1890 г. Царскосельская станция и сеть были реконструированы и переведены на однофазный переменный ток напряжением 2 кВ. По свидетельству современников, Царское Село было первым городом в Европе, который был освещен исключительно электричеством.

Крупнейшей в России электростанцией однофазного тока была станция на Васильевском острове в Петербурге, построенная в 1894 г. инж. Н. В. Смирновым. Мощность ее составляла 800 кВт и превосходила мощность любой существовавшей в то время станции постоянного тока. В качестве первичных двигателей использовались четыре вертикальные паровые машины мощностью 250 л. с. каждая с давлением пара 13 ат. Каждый из шести водотрубных котлов имел поверхность нагрева 150 м². Применение переменного тока напряжением 2000 В позволило упростить и удешевить электрическую сеть (сечение проводов 58 мм² вместо обычных 400—600 мм² в сетях постоянного тока) и увеличить радиус электроснабжения (более

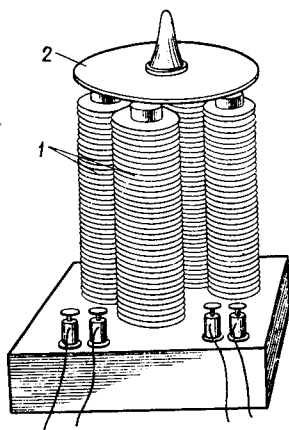


Рис. 6.17. Прибор Бейли

2 км при потере до 3% напряжения в магистральных проводах вместо 17—20% в сетях постоянного тока).

Таким образом, опыт эксплуатации центральных станций и сетей однофазного тока показал преимущества переменного тока, но вместе с тем, как уже отмечалось, выявил ограниченность его применения. Однофазная система тормозила развитие электропривода, усложняла его. Так, например, при подключении к сети Дептфордской станции силовой нагрузки приходилось дополнительно помещать на валу каждого синхронного однофазного двигателя еще разгонный коллекторный двигатель переменного тока. Легко понять, что такое усложнение электропривода делало весьма сомнительной

возможность его широкого применения.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ. ДВУХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Начало современного этапа в развитии электротехники относится к 90-м годам прошлого столетия, когда была решена комплексная энергетическая проблема, соединившая в себе технические основы электропередачи и электропривода. Это решение было найдено в применении различных многофазных цепей, из которых многолетняя практика сделала выбор в пользу цепей трехфазных.

Наиболее интересными и новыми элементами трехфазной системы явились электродвигатели, действие которых основано на использовании явления вращающегося магнитного поля.

Ранее упоминался опыт Араго, в котором содержался принцип асинхронного электродвигателя с вращающимся магнитным полем. Однако это поле создавалось не неподвижным устройством, каким в современных машинах является статор, а вращающимся магнитом.

Долгое время явление, открытое Араго, не находило себе практического применения. Только в 1879 г. У. Бейли (Англия) сконструировал прибор (рис. 6.17), в котором пространственное перемещение магнитного поля осуществлялось с помощью неподвижного устройства — путем поочередного намагничивания четырех расположенных по периферии круга электромагнитов 1. Намагничивание производилось импульсами постоянного тока, посылаемыми в обмотки электромагнитов специально приспособленным для этого коммутатором. Полярность верхних концов стержней изменялась в определенной последовательности так, что через каждые восемь переключений коммутатора магнитный поток изменял свое направление в пространстве на 360° . Над полюсами электромагнитов, как и в опытах Араго, был подвешен медный диск 2. Бейли

указывал, что при бесконечно большом числе электромагнитов можно было бы обеспечить равномерное вращение магнитного поля. Прибор Бейли не нашел никакого применения. Тем не менее, он был некоторым связующим звеном между опытом Араго и более поздними исследованиями.

К открытию явления вращающегося магнитного поля в современном его понимании пришли независимо друг от друга итальянский ученый Г. Феррарис и югославский ученый и изобретатель, работавший большую часть жизни в Америке, Н. Тесла.

Способ получения вращающегося магнитного поля Феррарис нашел в 1885 г., а впервые сообщил о своем открытии в докладе Туринской академии наук в марте 1888 г. Двумя месяцами позже, в мае того же года, с изложением существа своих открытий выступил Тесла, хотя идеи о бесколлекторном электро-двигателе переменного тока у него появились еще в 1882 г.

Феррарис и Тесла показали, что если две катушки, расположенные под прямым углом друг к другу, питать двумя переменными синусоидальными токами, отличающимися друг от друга только по фазе, и если этот фазовый сдвиг составляет 90° , то вектор суммарной магнитной индукции в точке пересечения осей катушек получает равномерное вращательное движение, не изменяясь, однако, по абсолютной величине. Так, было установлено, что с помощью двух или более переменных токов можно получить непрерывно вращающееся магнитное поле. Минимально необходимое для этого число токов равно двум. Поэтому вполне естественно, что исследование многофазных систем началось с двухфазной системы.

На рис. 6.18 представлен внешний вид модели двухфазного двигателя Феррариса, хранящейся в Национальном институте электротехники в Турине (Италия). Достаточно подвести к парам взаимно-перпендикулярных катушек 1 два тока, отличающихся по фазе на 90° , как между полюсами катушек возникает вращающееся магнитное поле и медный цилиндр 2 (ротор) начнет вращаться. Двигатель развивал мощность около 3 Вт. Но как получить два тока, отличающихся по фазе на 90° или по крайней мере на угол, близкий к 90° ? Феррарис решал эту задачу двумя путями. В одном случае пара катушек включалась в первичную цепь трансформатора с разомкнутой магнитной системой, другая пара — во вторичную*; в другом — в цепь первой пары катушек включался добавоч-

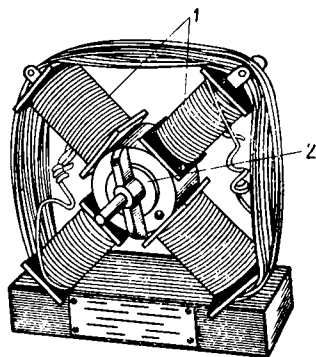


Рис. 6.18. Модель двухфазного асинхронного двигателя Феррариса (хранится в музее г. Турина, Италия)

* Для того чтобы этот сдвиг был по возможности близок к 90° , обмотка одной пары катушек имела большее сопротивление, чем другой, о чем можно

ный резистор, а в цепь второй — добавочная катушка индуктивности.

Таким образом, один путь получения двухфазной системы токов состоял в «расщеплении» обычного однофазного переменного тока; при этом создавалась так называемая искусственная или вспомогательная фаза. Этот метод требовал дополнительных довольно сложных устройств для «расщепления» фаз, и, кроме того, фазовый сдвиг практически никогда не составлял 90° , что приводило к искажению вращающегося поля.

Но не эти недостатки (на которые, собственно, сначала и не обратили внимания) помешали Феррарису и некоторым его современникам разработать конструкцию промышленного двухфазного электродвигателя. В своем теоретическом исследовании Феррарис предположил, что электрический двигатель так же, как это принято в технике передачи сигналов, должен работать не при максимальной к. п. д., а при максимальной полезной мощности. Простые математические преобразования показывали, что такому условию удовлетворяет двигатель, ротор которого имеет скольжение, равное 50%, т. е. вращается со скоростью, вдвое меньшей, чем скорость вращающегося магнитного поля. Такой ротор должен иметь обмотку с большим сопротивлением. Дальнейший математический анализ привел Феррариса к тому, что двигатель, построенный на использовании свойств вращающегося магнитного поля, принципиально не может иметь к. п. д. выше 50%. Естественно, столь низкий к. п. д. не мог удовлетворить электротехников-практиков, и интерес к работам Феррариса заметно ослабел. Так, ошибочное начальное условие в теоретическом анализе на некоторое время задержало развитие прогрессивной по своему существу технической идеи.

Для полноты представлений о развитии двухфазной системы можно добавить, что в 1889—1890 гг. были построены первые конденсаторные двигатели, в которых сдвиг по фазе осуществлялся с помощью конденсаторов.

По иному пути пошли некоторые другие изобретатели, и среди них наибольших успехов добился Никола Тесла. Тесла, не прибегая к попыткам получить необходимую разность фаз в самом двигателе, пришел к выводу о целесообразности построения такого генератора, который сразу давал бы два тока, различающихся по фазе на 90° .

Тесла построил двухфазный генератор и питал от него двухфазный асинхронный двигатель. Схематически система Тесла в ее наиболее характерной форме представлена на рис. 6.19: слева изображен синхронный генератор, справа — асинхронный двигатель. В генераторе между полюсами вращались две взаимно-перпендикулярные катушки, в которых генерировались два тока, сдвинутые по фазе на 90° . Концы каждой катушки были выведены на кольца, расположенные на валу генератора (на чертеже для ясно-

судить по размерам катушек на рис. 6.18. Благодаря этому во вторичную цепь трансформатора вводилось большое активное сопротивление, что приводило к уменьшению фазового сдвига в этой цепи.

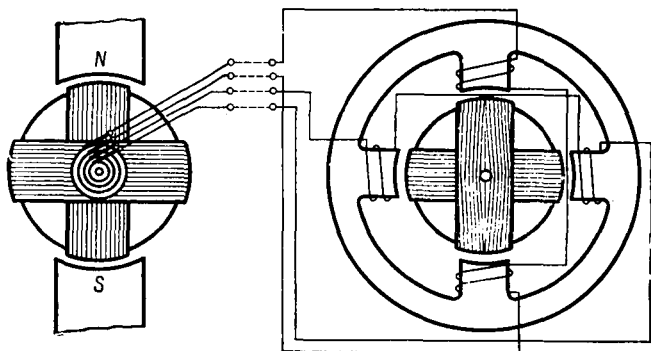


Рис. 6.19. Схема генератора и двигателя Тесла

сти эти кольца имеют различные диаметры). Ротор двигателя тоже имел обмотку в виде двух расположенных под прямым углом друг к другу замкнутых на себя катушек.

Основным недостатком двигателя Тесла, который впоследствии сделал его неконкурентоспособным, было наличие выступающих полюсов с сосредоточенной обмоткой. Эти двигатели имели большое магнитное сопротивление и крайне неблагоприятное распределение намагничивающей силы вдоль воздушного зазора, что приводило к ухудшению характеристик машины. Таковы были следствия механического переноса в технику переменного тока конструктивных схем машины постоянного тока.

Конструкция обмотки ротора, как выяснилось позднее, тоже оказалась неудачной. Действительно, выполнение обмоток сосредоточенными (а не распределенными по всей окружности ротора) при выступающих полюсах на статоре приводило к ухудшению пусковых условий двигателя (зависимость величины пускового момента от начального положения ротора), а то обстоятельство, что обмотки ротора имели сравнительно большое сопротивление, ухудшало рабочие характеристики.

Неудачным оказался и выбор двухфазной системы токов из всех возможных многофазных систем. Известно, что значительную долю стоимости установки для передачи электроэнергии составляют затраты на линейные сооружения и, в частности, на линейные провода. В связи с этим казалось очевидным, что чем меньше принятое число фаз, тем меньшим будет число проводов и тем, следовательно, экономичнее устройство электропередачи. Двухфазная система требовала применения четырех проводов, а удвоение числа проводов по сравнению с установками постоянного или однофазного переменного токов представлялось нежелательным. Поэтому Тесла предлагал в некоторых случаях применять в двухфазной системе трехпроводную линию, т. е. делать один провод общим. В этом случае число проводов уменьшалось до трех. Однако расход металла на провода при этом снижался меньше, чем можно было

ожидать, так как сечение общего провода должно быть примерно в 1,5 раза (точнее, в $\sqrt{2}$ раза) больше сечения каждого из двух других проводов в связи с тем, что синусоидальный ток в общем проводе в $\sqrt{2}$ раз больше каждого из двух синусоидальных токов других проводов.

Встретившиеся экономические и технические трудности задерживали внедрение двухфазной системы в практику. Фирма Вестингауз, где работал Тесла, построила несколько станций по его системе, из которых наибольшей по масштабам была Ниагарская гидроэлектростанция.

ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА

В то время как Тесла и его сотрудники пытались усовершенствовать двухфазную систему, в Европе была разработана более совершенная электрическая система — трехфазная. Изучение документальных материалов показывает, что в 1887—1889 гг. многофазные системы разрабатывались с большим или меньшим успехом несколькими учеными и инженерами.

Например, в Америке Ч. Бредли, стремясь изготовить электрическую машину с лучшим использованием активных материалов, конструировал двух- и трехфазные генераторы. Однако Бредли не знал о явлении вращающегося магнитного поля и предполагал, что потребители в его многофазных системах должны включаться как однофазные на каждую пару проводов.

Немецкий инженер Ф. Хазельвандер подошел к трехфазной системе токов с других исходных позиций. Зная, что коллектор у генератора и двигателя постоянного тока выполняет взаимообратные функции, он решил его устранить. Для этого достаточно те точки обмоток якорей каждой из машин, от которых идут отпайки к пластинам коллектора, соединить соответственно друг с другом. Это удобно сделать у обращенных машин, якоря которых неподвижны, а полюсы вращаются. Тогда генератор будет связан с двигателем числом проводов, равным числу коллекторных пластин. Стремясь уменьшить число линейных проводов, Хазельвандер нашел минимальный вариант: три провода. Однако Хазельвандер не сумел увидеть всех возможностей новой системы и создать пригодные для практики конструкции машин.

Наибольших успехов в развитии многофазных систем добился М. О. Доливо-Добровольский, который сумел придать своим работам практический характер. Поэтому он по праву считается основоположником трехфазной техники.

Осенью 1888 г. Доливо-Добровольский, тогда еще молодой инженер, познакомившись с содержанием доклада Феррариса, не согласился с его выводом о практической непригодности индукционного электродвигателя. Еще до этого Доливо-Добровольский заметил, что если замкнуть накоротко обмотку якоря двигателя постоянного тока при его торможении (т. е. в опыте динамического торможения), то возникает тормозящий момент большой величины. «Я

тотчас же сказал себе, — вспоминал позднее Доливо-Добровольский, — что если сделать вращающееся поле по методу Феррариса и поместить в него такой короткозамкнутый якорь малого сопротивления, то этот якорь скорее сам сгорит, чем будет вращаться с небольшим числом оборотов. Мысленно я прямо представил себе электродвигатель многофазного тока с ничтожным скольжением».

Так, Доливо-Добровольский пришел к выводу о нецелесообразности изготовления обмотки ротора с таким большим сопротивлением, при котором ротор имел бы скольжение около 50%.

В стержнях обмотки малого сопротивления при небольшом скольжении возникнут токи, которые в достаточно сильном поле статора создадут значительный вращающий момент.

Усиленная деятельность в этом направлении в необычайно короткий срок привела к разработке трехфазной электрической системы и совершенной, в принципе не изменившейся до настоящего времени конструкции асинхронного электродвигателя.

Первым важным шагом, который сделал Доливо-Добровольский, было изобретение ротора с обмоткой в виде беличьей клетки. С точки зрения уменьшения сопротивления обмотки ротора лучшим конструктивным решением мог бы быть ротор в виде медного цилиндра, как в двигателе Феррариса. Но медь является плохим проводником для магнитного потока статора, и к. п. д. такого двигателя был бы очень низким. Если же медный цилиндр заменить стальным, то магнитный поток резко возрастает, но вместе с тем электрическая проводимость у стали меньше, чем у меди, и поэтому к. п. д. опять не может быть высоким. Выход из этого противоречия состоял в том, чтобы выполнить ротор в виде стального цилиндра (что уменьшало магнитное сопротивление ротора) и в просверленные по периферии последнего каналы закладывать медные стержни (что уменьшает электрическое сопротивление ротора).

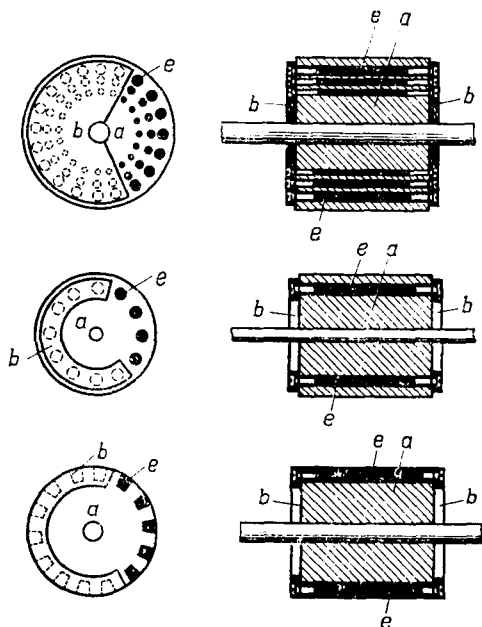


Рис. 6.20. Варианты роторов с обмоткой в виде беличьей клетки (из патента М. О. Доливо-Добровольского):

a — стальной цилиндр; *e* — медные стержни;
b — медные пластины или кольца

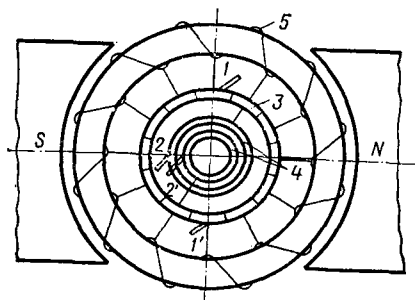


Рис. 6.21. Схема одноякорного преобразователя:

1—1' — щетки со стороны постоянного тока; 2—2' — щетки со стороны переменного тока; 3 — коллектор; 4 — кольца; 5 — обмотка якоря

На лобовых частях ротора эти стержни должны быть хорошо электрически соединены друг с другом. На рис. 6.20 представлены чертежи из первого патента Доливо-Добровольского в области трехфазной системы. Этим патентом (заявлен 8 марта 1889 г.) Доливо-Добровольский закрепил за собой изобретение ротора с беличьей клеткой, т. е. той конструкции ротора асинхронного двигателя, которая принципиально сохранилась в том же виде и до настоящего времени.

Важнейшим этапом в трудах Доливо-Добровольского явилась

замена двухфазной системы трехфазной. Он совершенно справедливо отмечал, что при увеличении числа фаз улучшается распределение намагничивающей силы по окружности статора асинхронного двигателя и использование машины. Уже переход от двухфазной системы к трехфазной дает значительный выигрыш в этом отношении. Дальнейшее увеличение числа фаз не являлось целесообразным, так как оно привело бы к значительному увеличению расхода меди на провода. Вскоре, как будет показано далее, выяснились и другие преимущества трехфазной системы.

Но каким образом проще всего получить трехфазную систему? Уже был известен способ, при помощи которого обычную машину постоянного тока можно было превратить в генератор переменного тока. П. Н. Яблочков и З. Грамм еще в конце 70-х годов секционировали кольцевой якорь генератора и получали от каждой секции переменный ток. В середине 80-х годов были построены первые вращающиеся одноякорные преобразователи. Эти преобразователи очень просто получались из обычной машины постоянного тока: от двух диаметрально противоположных точек обмотки якоря двухполюсной машины делались отпайки, которые выводились на контактные кольца. В этом случае к коллектору машины подводился постоянный ток, а с колец снимался переменный ток (рис. 6.21). Если в том же якоре машины постоянного тока сделать отпайки от четырех равноотстоящих точек, то на четырех соответственно кольцах легко получить двухфазную систему токов (рис. 6.22, а).

Тесла построил синхронный генератор, в котором имелись три независимые катушки, расположенные под углом 60° друг к другу. Такой генератор давал трехфазную систему токов, но требовал для передачи энергии шесть проводов, так как в этом случае получалась несвязанная трехфазная цепь с токами, отличающимися друг от друга по фазе на 60° .

Доливо-Добровольский в результате исследования различных схем обмоток сделал ответвления от трех равноотстоящих точек

якоря машин постоянного тока. Таким образом были получены токи с разностью фаз 120° (рис. 6.22, б). Сохранив в этой машине коллектор, можно было использовать ее в качестве одноякорного преобразователя.

Таким путем была найдена связанная трехфазная система, которая отличается той особенностью, что она требует для передачи и распределения элек-

троэнергии только три провода. В двухфазной системе Тесла также имелась возможность обойтись тремя проводами, однако достоинства симметричной связанной трехфазной цепи подкреплялись другими преимуществами как двигателей, так и вообще трехфазной системы. Последняя является симметричной, уравновешенной и экономичной. На три провода в трехфазной системе при прочих равных условиях требовалось затратить металла на 25% меньше, чем на два провода в однофазной*. Эта очевидная экономия металла в значительной мере способствовала в свое время решению вопроса о выборе тока.

Дальнейшее увеличение числа фаз привело бы к некоторому улучшению использования электрических машин, но вызвало бы соответствующее увеличение числа линейных проводников. Таким образом, трехфазная система электрических токов является оптимальной.

Системе трех «сопряженных» токов Доливо-Добровольский дал специальное наименование «Dvehstrom», что в переводе на русский язык означает «вращающий ток». Указанный термин, хорошо характеризующий способность образовывать вращающееся магнитное поле, до настоящего времени сохранился в немецкой литературе.

Весной 1889 г. был построен первый трехфазный асинхронный двигатель мощностью около 100 Вт (рис. 6.23). Этот двигатель питался током от трехфазного одноякорного преобразователя и при испытаниях показал вполне удовлетворительные результаты.

Вслед за первым преобразователем был создан второй, более мощный, а затем началось изготовление трехфазных синхронных

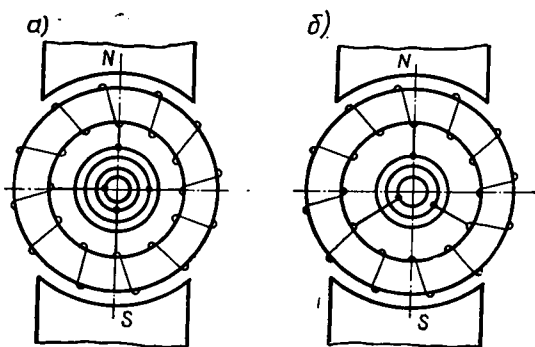


Рис. 6.22. Схемы двухфазного (а) и трехфазного (б) одноякорных преобразователей

* Эту экономию в металле проводников легко подсчитать, если принять во внимание, что мощность в трехфазной системе $P_3 = \sqrt{3} U I_3 \cos \varphi$, а в однофазной $P_1 = U I_1 \cos \varphi$. При прочих равных условиях для передачи одинаковой мощности в проводах однофазной системы должен иметь место ток в $\sqrt{3}$ раз больший, чем в проводах трехфазной системы.

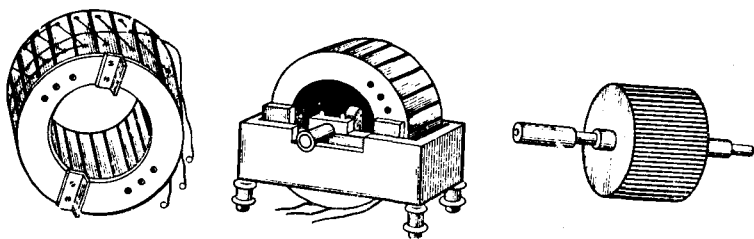


Рис. 6.23. Первый трехфазный асинхронный двигатель М. О. Доливо-Добровольского (в собранном и разобранном видах)

генераторов. Уже в первых генераторах применялись два основных способа соединения обмоток: звездой и треугольником. В дальнейшем Доливо-Добровольскому удалось улучшить использование статора с помощью широко применяемого в настоящее время метода, заключающегося в том, что обмотку делают разрезной и противолежащие катушки соединяют встречно.

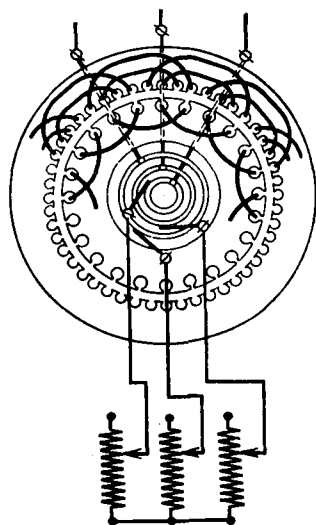
Важным достижением Доливо-Добровольского явилось также то, что он отказался от выполнения двигателя с выступающими полюсами и сделал обмотку статора распределенной по всей его окружности, благодаря чему значительно уменьшилось магнитное рассеяние по сравнению с двигателями Тесла. Так трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором получил современные конструктивные формы. Вскоре Доливо-Добровольским было внесено еще одно усовершенствование: кольцевой тип обмотки статора был заменен барабанным. После этого асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором приобрел вполне современный вид.

Новое затруднение в развитии трехфазной техники возникло в связи с ограниченной мощностью первых источников энергии как отдельных генераторов, так и электростанций в целом. Дело в том, что пусковой ток асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может в несколько раз превышать номинальный, и поэтому включение двигателей мощностью свыше 2—3 кВт уже отражалось на работе других потребителей.

М. О. Доливо-Добровольский в 1890 г. изготовил двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью примерно 3,7 кВт и при первом же испытании установил значительное ухудшение пусковых свойств. Причина этого заключалась в том, что короткозамкнутый ротор был «слишком замкнут накоротко». При увеличении сопротивления обмотки ротора пусковые условия заметно улучшались, но рабочие характеристики двигателя ухудшались. Анализ возникших затруднений привел к созданию так называемого фазного ротора, т. е. такого ротора, обмотка которого делается, подобно обмотке статора, трехфазной и концы которой соединяются с тремя кольцами, насаженными на вал. С помощью щеток эти кольца соединяются с пусковым реостатом. Таким образом, в момент пуска включается в цепь ротора большое сопротивление, которое выводится

по мере нарастания скорости. На рис. 6.24 представлена схема трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором и пусковым реостатом.

Но фазный ротор требовал устройства на валу двигателя контактных колец, а это рассматривалось многими электротехниками как недостаток по сравнению с короткозамкнутым ротором, не имевшим никаких трущихся контактов. Однако с этим недостатком пришлось мириться, и, несмотря на то что впоследствии были разработаны различные меры по улучшению условий пуска крупных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, двигатели с контактными кольцами применяются в промышленности до настоящего времени.



ТРЕХФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Трехфазная система не получила бы в первые же годы своего существования быстрого распространения, если бы она не решила проблемы передачи энергии на большие расстояния. Но электропередача выгодна при высоком напряжении, которое в случае переменного тока получается при помощи трансформатора. Трехфазная система не представляла принципиальных затруднений для трансформирования энергии, но требовала трех однофазных трансформаторов вместо одного при однофазной системе. Такое увеличение числа довольно дорогих аппаратов не могло не вызвать стремления найти более удовлетворительное решение.

В 1889 г. Доливо-Добровольский изобрел трехфазный трансформатор. Вначале это был трансформатор с радиальным расположением сердечников (рис. 6.25); его конструкция еще напоминает машину с выступающими полюсами, в которой устранен воздушный зазор, а обмотки ротора перенесены на стержни. Затем было предложено несколько конструкций так называемых «призматических» трансформаторов, в которых удалось получить более компактную форму магнитопровода (рис. 6.25, б—г). Наконец, в октябре 1891 г. была сделана патентная заявка на трехфазный трансформатор с параллельными стержнями, расположенными в одной плоскости (рис. 6.25, д). В принципе эта конструкция сохранилась по настоящее время.

Целям электропередачи отвечали также работы, связанные с изучением схем трехфазной цепи. В 80—90-х годах прошлого века значительное место занимала осветительная нагрузка, которая часто вносила существенную несимметрию в систему. Кроме того, ино-

Рис. 6.24. Трехфазный асинхронный двигатель М. О. Доливо-Добровольского с фазным ротором и пусковым реостатом

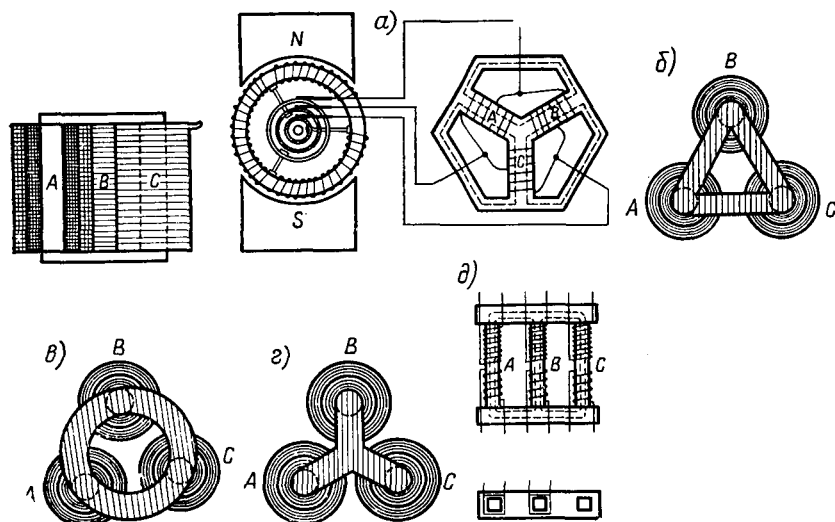


Рис. 6.25. Трансформаторы М. О. Доливо-Добровольского:
 а — с радиальным расположением сердечников; б — в — «призматические»; г — с параллельным расположением стержней в одной плоскости

гда было желательно иметь в своем распоряжении не одно, а два напряжения: одно — для осветительной нагрузки, а другое, повышенное, — для силовой.

Чтобы иметь возможность регулировать напряжение в отдельных фазах и располагать двумя напряжениями в системе (фазным и линейным), Доливо-Добровольский разработал в 1890 г. четырехпроводную схему трехфазной цепи или, иначе, систему с нейтральным проводом. Сразу же он указал, что вместо нейтрального, или нулевого, провода можно использовать землю. Доливо-Добровольский обосновал свои предложения доказательством того, что четырехпроводная трехфазная система позволяет допускать определенную несимметрию нагрузки; при этом напряжение на зажимах каждой фазы будет оставаться неизменным. Для регулирования напряжения в отдельных фазах четырехпроводной системы Доливо-Добровольский предложил использовать изобретенный им трехфазный автотрансформатор.

Таким образом, в течение 2—3-х лет были конструктивно разработаны все основные элементы трехфазной системы электроснабжения: трансформатор, трехпроводная и четырехпроводная линии передачи и асинхронный двигатель в двух его основных модификациях (с фазным и короткозамкнутым ротором). Из всех возможных конструкций многофазных синхронных генераторов, принцип построения которых был уже задолго до того известен, получили широкое практическое применение только трехфазные машины. Так зародилась и получила свое начальное развитие трехфазная система электрического тока.

Изучение истории техники трехфазных цепей показывает, что решающую роль в ее зарождении и развитии сыграли труды М. О. Доливо-Добровольского. Он не только разработал основные элементы трехфазной системы, но и сделал ряд важнейших изобретений в области техники постоянного тока, в электронизмерительной технике; ему принадлежат также некоторые другие работы, с которыми мы познакомимся ниже. Несомненно, столь быстрый и полный успех трудов М. О. Доливо-Добровольского во многом определяется тем обстоятельством, что его труды отвечали основным требованиям эпохи. Действительно, Доливо-Добровольский начал свою инженерную и научную деятельность в тот период, когда развивавшиеся производительные силы общества ставили перед электротехникой все новые и более ответственные задачи. Основное направление работ Доливо-Добровольского совпало с главным направлением в развитии электроэнергетики. Кроме того, нельзя упускать из виду, что Доливо-Добровольский работал в условиях наиболее развитой из того времени германской электротехнической промышленности и, являясь одним из технических руководителей крупнейшей электротехнической фирмы, располагал большими возможностями для экспериментального исследования и практической реализации своих изобретений. В то время как многим его современникам не доставало либо инженерного подхода к решению возникающих проблем (Бредли, Тесла), либо материально-технической базы (Хазельвандер), у Доливо-Добровольского было и то и другое, помноженное на его глубокие знания теории и огромную работоспособность.

ПЕРВАЯ ТРЕХФАЗНАЯ ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Генеральным испытанием трехфазной системы явилась Лауфен — Франкфуртская экспериментальная электропередача. Этот выдающийся для своего времени эксперимент был приурочен к Международной электротехнической выставке и Международному конгрессу электротехников, которые проводились в 1891 г. во Франкфурте-на-Майне (Германия).

Организаторы Франкфуртской выставки по инициативе видного немецкого электротехника О. фон Миллера предложили фирме АЕГ, в которой в то время работал Доливо-Добровольский, передать посредством электричества энергию водопада на р. Неккар (близ местечка Лауфен) на территорию выставки во Франкфурт. Расстояние между этими двумя пунктами составляло 170 км. В Лауфене в распоряжение строителей передачи выделялась турбина, дававшая полезную мощность около 300 л. с.

До этого времени дальность электропередачи, не считая нескольких опытных установок, не превышала 15 км, и ряд компетентных специалистов полагали, что к. п. д. установки может оказаться ниже 50%.

Правление фирмы АЕГ согласилось осуществить электропередачу, и Доливо-Добровольскому предстояло в течение года спроектировать и построить асинхронный двигатель мощностью около 75 кВт и трехфазные трансформаторы мощностью 100—150 кВА. Изготовление генератора было поручено главному инженеру швейцарского завода «Эрликон» Ч. Броуну, который сотрудничал с Доливо-Добровольским в области конструирования многофазных машин. Срок был чрезвычайно коротким, а задачи — весьма ответственными: во-первых, новая система тока должна была подвергнуться испытанию перед лицом представителей всего мира; во-вторых, масштабы испытания были невиданными. Двигатели и трансформаторы на такие мощности еще никогда не строились. Об опытных конструкциях не могло быть и речи. Доливо-Добровольский писал по поводу возникшей задачи: «Если я не хотел навлечь на мой трехфазный ток несмыслимого позора и подвергнуть его недоверию, которое вряд ли удалось бы потом быстро рассеять, я обязан был принять на себя эту задачу и разрешить ее. В противном случае опыты Лауфен — Франкфурт и многое, что должно было затем развиваться на их основе, пошли бы по пути применения однофазного тока».

В августа 1891 г. на выставке впервые зажглись 1000 ламп накаливания, питаемых током от Лауфенской гидростанции; 12 сентября того же года двигатель Доливо-Добровольского привел в действие декоративный водопад. Налицо была своеобразная энергетическая цепь: небольшой искусственный водопад приводился в действие энергией естественного водопада, удаленного от первого на

170 км. Это символизировало новую большую победу человечества над природой. Проблема передачи энергии на большие расстояния была решена.

Что же представляла собой эта первая трехфазная линия?

На гидроэлектростанции в Лауфене энергия, развиваемая турбиной, передавалась через коническую зубчатую передачу на вал трехфазного синхронного генератора (230 кВА, 150 об/мин, 95 В, соединение обмоток в звезду). От генератора медные шины вели к распределительному щиту. На последнем были установлены амперметры и вольтметры, свинцовые предохранители и максимальноминимальные токовые реле, воздействовавшие на цепь возбуждения.

В Лауфене и Франкфурте находилось по три трехфазных трансформатора с призматической формой магнитопровода. В начале испытаний на каждом конце линии было включено по одному трансформатору мощностью 150 кВА каждый, с коэффициентами трансформации 154 в Лауфене и 116 во Франкфурте. Поскольку приборов для измерения высокого напряжения не было, величину вторичного напряжения определяли простым умножением первичного напряжения на коэффициент трансформации. Трансформаторы были погружены в баки, наполненные маслом.

Трехпроводная линия была проведена на деревянных опорах со средним пролетом около 60 м. Медный провод диаметром 4 мм крепился на штыревых фарфорово-масляных изоляторах. Интересной деталью линии являлось устройство плавких предохранителей со стороны высокого напряжения. В начале линии в разрыв каждого провода был включен участок длиной 2,5 м, состоявший из двух медных проволок диаметром 0,15 мм каждая. Для отключения линии во Франкфурте посредством простого приспособления устраивалось трехфазное короткое замыкание, плавкие вставки перегорали, турбина начинала развивать большую скорость, и машинист, заметив это, останавливал ее.

На выставочной площади во Франкфурте был установлен понижающий трансформатор, от которого при напряжении 65 В питались 1000 ламп накаливания, расположенных на огромном щите. Здесь же был установлен трехфазный асинхронный двигатель Доливо-Добровольского (рис. 6.26), приводивший в действие гидравлический насос мощностью около 100 л. с. Двигатель был выполнен обращенным, т. е. с питанием со стороны ротора. Одновременно с этим мощным двигателем Доливо-Добровольский экспонировал асинхронный трехфазный двигатель мощностью около 100 Вт с вентилятором на его валу и двигатель мощностью 1,5 кВт с сидящим на его валу генератором постоянного тока; последний питал лампы накаливания.

Испытания электропередачи, которые производились Международной комиссией, дали следующие результаты: минимальный к. п. д. электропередачи (отношение мощности на вторичных зажимах трансформатора во Франкфурте к мощности на валу турбины в Лауфене) — 68,5%, максимальный к. п. д. — 75,2%; линейное напряжение при испытаниях составляло около 15 кВ.

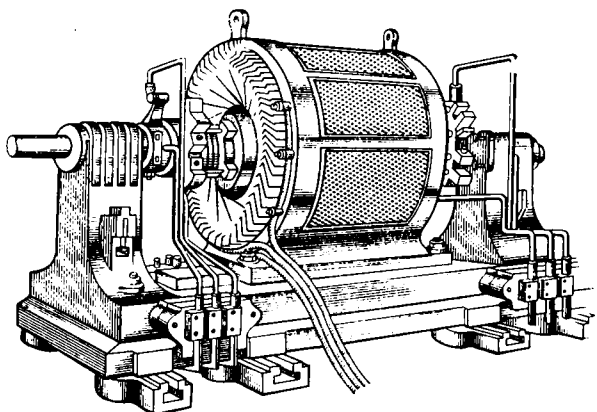


Рис. 6.26. Асинхронный двигатель, изготовленный для Франкфуртской выставки

Характерен заключительный вывод комиссии: «...работа линии с переменными токами напряжением от 7500 до 8500 В (фазное.— *Авт.*), изолированной маслом, фарфором и воздухом, длиной больше ста километров, протекала всегда равномерно, безопасно и без нарушений, как и работа с переменными токами напряжением в несколько сотен вольт и при длине линии в несколько метров». Было также проведено дополнительное испытание линии электропередачи при более высоком напряжении — 25,1 кВ; максимальный к. п. д. составил 78,9%.

Интересно отметить, что при испытаниях электропередачи при повышенном напряжении впервые встретились с такими явлениями, как работа синхронного генератора на почти холостую линию (во Франкфурте было включено лишь несколько ламп), когда ток имел емкостной характер, и в связи с этим наблюдались повышенные напряжения на зажимах трансформатора, соединенного с генератором одножильными кабелями, и уменьшение потребной мощности возбуждения из-за намагничивающего действия реакции якоря. Кроме того, при пуске линии путем постепенного увеличения скорости турбины и соединенного с ней генератора наблюдался переход электрической цепи через резонанс. Эти «необычайные», как тогда отмечалось, явления заставили снизить частоту во второй серии испытаний с 40 до 24 Гц.

Электропередача Лауфен — Франкфурт подвела итог исследованиям в области многофазных токов. Трехфазная система была блестяще продемонстрирована представителям многих стран мира. Так, из всех возможных многофазных систем выбор был сделан в пользу системы трехфазной. Результаты Лауфен — Франкфуртской передачи открыли этому роду тока широкий путь в промышленность.

РАЗРАБОТКА ОСНОВ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ, МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

До 80-х годов прошлого века были предприняты лишь отдельные попытки анализа процессов в цепях переменного тока. Так, например, Б. С. Якоби, анали-

зируя процесс наведения э. д. с. в электрической машине, установил зависимость, которую в современных символах можно выразить формулой

$$E = k\omega\Phi_m,$$

где E — э. д. с.; ω — угловая скорость якоря электрической машины; ω — число витков обмотки; Φ_m — магнитный поток.

Постепенно началось изучение таких явлений, как самоиндукция, сдвиг фаз, потери в стали. В 1847 г. Э. Х. Ленц установил, что переменный ток, наводимый в обмотках электрических машин, по времени не совпадает с э. д. с. Это было первое наблюдение действия индуктивности. П. Н. Яблочков в 1877 г. наблюдал емкостные явления в цепи переменного тока, но не сумел их правильно объяснить. В своих исследованиях Дж. К. Максвелл пользовался представлениями о полном сопротивлении цепи, в которую входили омическое сопротивление и индуктивность. В 80-х годах процессы в цепях с индуктивностью или емкостью были уже использованы для практических целей Г. Феррарисом, Н. Теслой и другими учеными и инженерами, работавшими в области многофазных систем.

Однако многие явления в цепях переменного тока представлялись чрезвычайно сложными, запутанными, не поддающимися сколько-нибудь точному учету. Все это, а также ожесточенная конкурентная борьба сторонников постоянного тока тормозило развитие техники переменного тока.

Все же в конце 80-х годов в разных странах начали появляться первые обобщающие теоретические исследования по переменному току. В 1887 г. Г. Капп, впоследствии профессор Бирмингемского университета, вывел точную формулу для э. д. с., которая в современных обозначениях известна каждому электрику:

$$E = 4,44\omega f\Phi_m,$$

где ω — число витков; f — частота; Φ_m — магнитный поток.

Большой вклад в развитие теории переменного тока внес Г. Феррарис, который в книге «О разности фаз у токов, о запаздывании вследствие индукции и о потерях в трансформаторе» (1886 г.) впервые рассматривает разность фаз токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора, а также дает методы расчета потерь на гистерезис и вихревые токи. Позднее, в 1893 г., он исследовал и процессы в однофазных двигателях, применив метод вращающихся векторов.

Важную роль в становлении современных представлений в области теории переменного тока сыграли исследования М. О. Доливо-Добровольского. В своем докладе на Международном конгрессе электриков во Франкфурте-на-Майне (1891 г.) Доливо-Добровольский показал, что величина магнитного потока в магнитопроводе катушки, включенной в цепь переменного тока, целиком определяется величиной напряжения (если считать частоту и число витков заданными) и не зависит от магнитного сопротивления; с изменением магнитного сопротивления меняется только намагничивающий ток. Это положение, которое Доливо-Добровольский называет первым основным положением теории переменного тока, действительно является исходным во всех расчетах электромагнитных устройств. Далее он отметил, что если магнитный поток изменяется синусоидально, то э. д. с. (или, соответственно, напряжение) также изменяется по закону синуса, причем э. д. с. и магнитный поток различается по фазе на $\pi/2$. Им впервые были введены понятия активной и реактивной составляющих тока, которые он называл соответственно ваттным (рабочим) и безваттным (возбудительным) токами. Метод разложения любого тока на две составляющие был рекомендован Доливо-Добровольским для практических расчетов и анализа процессов в электрических машинах и аппаратах.

Доливо-Добровольский рекомендовал принять в качестве основной формы кривой тока синусоиду. В отношении частоты тока он высказался за 30—40 Гц. Позднее в результате критического отбора получили применение лишь две частоты промышленного тока: 60 Гц в Америке и 50 Гц в других странах. Эти частоты оказались оптимальными, ибо повышение частоты ведет к чрезмерному возрастанию скоростей электрических машин (при том же числе полюсов), а снижение частоты неблагоприятно сказывается на равномерности освещения.

Несколько позднее, в 1892 г., Доливо-Добровольский разработал на базе сформулированных выше положений основы теории и проектирования трансфор-

маторов, опровергнув распространившееся ошибочное утверждение о том, что трансформаторы принципиально не могут быть экономичными аппаратами. В 90-х годах трудами ряда ученых (С. Эвершеда, Бен-Эшенбурга, Г. Каппа и др.) были исследованы важнейшие вопросы теории трансформаторов, как-то: магнитное рассеяние, потеря напряжения; введен графический анализ.

В то же время начинают формироваться основы теории трехфазных машин. Еще Доливо-Добровольский дал первоначальный анализ распределения намагничивающей силы в трехфазной машине, исследовал некоторые вопросы параллельной работы синхронных генераторов, разработал руководящие принципы проектирования электрических машин.

Большое значение для развития теории асинхронной машины имела круговая диаграмма, которая дает наглядное представление о важнейших зависимостях между величинами, характеризующими работу машины. Теоретическое существование круговой диаграммы для асинхронной машины обосновал в 1894 г. А. Гейланд. Более точную круговую диаграмму, учитывающую все потери в машине, построил в 1899—1900 гг. Осанна. В 1907 г. К. А. Круг дал точное математическое доказательство круговой диаграммы.

Огромное значение для анализа процессов в цепях переменного тока имело введение символического метода, разработанного Ч. П. Штейнмецом (1897 г.). Позднее, уже в 20-х годах текущего столетия, для анализа несимметричных режимов в цепях переменного тока был применен метод симметричных составляющих (Фортеский).

ГЛАВА 7

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ

ПЕРВЫЕ ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Создание трехфазной системы явилось важнейшим этапом в развитии техники. Эта система вывела проблему передачи электроэнергии, а вместе с ней и электротехнику, из кризисного состояния, которое сложилось в 80-х годах прошлого века. Производительные силы получили новую техническую базу, во многом способствовавшую углублению и расширению процесса концентрации и централизации производства. Электрическая энергия, которая из мест ее дешевого получения могла теперь передаваться в удаленные промышленные районы, вызвала коренную реконструкцию энергохозяйства промышленных предприятий и начала внедряться в технологию. Процесс электрификации постепенно захватывал все новые области производственной деятельности, революционизировал развитие производительных сил и не мог не привести к глубоким социальным изменениям.

Первые электростанции постоянного и однофазного переменного токов имели либо очень малый радиус электроснабжения (станции постоянного тока), либо ограниченный круг потребителей (станции однофазного переменного тока). Удовлетворительно решить комплексную проблему электроснабжения позволили только трехфазные электростанции.

Первой в мире эксплуатировавшейся трехфазной электростанцией была Лауфенская. После закрытия Франкфуртской выставки электростанция в Лауфене перешла в собственность города Хейльбронна, расположенного в 12 км от Лауфена. Эта установка была пущена в эксплуатацию в начале 1892 г. На гидростанции были установлены два одинаковых трехфазных синхронных генератора. Напряжение (фазное) при помощи трансформаторов повышалось с 50 до 5000 В. Электроэнергия использовалась для питания всей городской осветительной сети, а также ряда небольших заводов и мастерских. Понижающие трансформаторы устанавливались непосредственно у потребителей.

В том же 1892 г. была сдана в эксплуатацию линия Бюлах — Эрликон (Швейцария). Машины для электростанции были спроектированы еще во время подготовки Франкфуртской выставки швейцарской фирмой «Эрликон». У водопада в Бюлахе была построена гидроэлектростанция с тремя трехфазными генераторами мощностью 150 кВт каждый. Электроэнергия передавалась на расстояние

23 км для электроснабжения завода. Вслед за этими первыми установками началось довольно быстрое строительство ряда электростанций, причем наибольшее их число было в Германии.

Известные трудности в развитии электрификации на базе трехфазных систем приходилось испытывать в связи с тем, что уже раньше в городах были построены станции постоянного или однофазного токов, а иногда и двухфазные. Владельцы и акционеры этих станций и электрических сетей всячески препятствовали внедрению трехфазной системы. Некоторым выходом явилось сочетание трехфазной электропередачи с распределением энергии на постоянном токе. Например, в 1893 г. в Боккенгейме (пригород Франкфурта) была сооружена электростанция с двумя трехфазными генераторами (по 150 кВт). Напряжение при помощи трансформаторов повышалось с 80 до 700 В, и энергия передавалась на подстанцию, находившуюся в центре промышленного района и удаленную от электростанции на 1,2 км. Большая часть энергии на подстанции преобразовывалась двигатель-генераторной установкой в энергию постоянного тока, которая и распределялась для электрического освещения. Аналогичное решение было принято несколько позднее при строительстве электростанции в северной части Берлина.

Первая трехфазная установка в Америке была сооружена в конце 1893 г. в Калифорнии. Гидроэлектростанция располагала двумя генераторами мощностью по 250 кВт. От электростанции были проведены две линии генераторного напряжения (2500 В). Первая из них длиной 12 км поставляла энергию для осветительных целей, а вторая длиной 7,5 км предназначалась для питания трехфазного асинхронного двигателя мощностью 150 кВт.

Темпы внедрения трехфазной системы в Америке вначале были заметно ниже, чем в Европе. Это объясняется тем, что в Америке одна из крупнейших фирм — компания «Вестингауз» — настойчиво пыталась развернуть работы по сооружению электростанций и электрических сетей по системе Тесла. Триумфом двухфазной системы считалась грандиозная по тому времени электростанция на Ниагарском водопаде, пущенная в эксплуатацию в 1896 г. Далее будет подробнее рассказано об этой гидроэлектростанции, здесь же отметим, что замечательные свойства трехфазной системы привлекли к ней внимание почти всех электротехнических фирм, в том числе и крупнейшей американской фирмы «Дженерал Электрик». Последняя развила бурную деятельность по строительству трехфазных установок, с которыми двухфазная система оказалась неконкурентоспособной. Та же Ниагарская гидроэлектростанция со временем была переоборудована в трехфазную.

Для переходного периода в любой области техники, и в области электротехники в частности, весьма характерны попытки комбинирования устаревающих и новых технических решений. Так, в течение почти двух десятилетий, начиная с 1891 г., были сделаны попытки «помирить» технику трехфазных систем с другими системами.

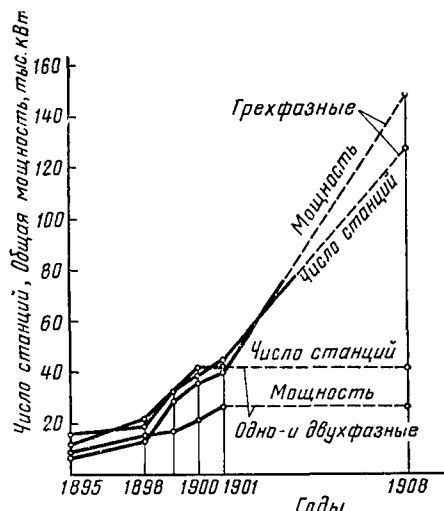


Рис. 7.1. Рост числа и мощности электростанций переменного тока в Германии

В эти годы существовали электростанции, на которых одновременно работали генераторы постоянного, переменного однофазного тока, двухфазные и трехфазные или любая их комбинация. Напряжения и частоты были различными, потребители питались по раздельным линиям. Попытки «спасти» устаревающие системы, а вместе с ними и освоенное заводами электрооборудование, приводили к созданию комбинированных систем. Таковыми, в частности, являлись так называемые моноциклические и полициклические системы переменного тока, а также комбинированная система постоянного и переменного токов.

Наиболее известной из комбинированных систем является

схема, предложенная в 1894 г. Скоттом. В основе этой схемы лежит так называемый «трансформатор Скотта», предназначенный для взаимного преобразования токов двухфазной и трехфазной систем.

Однако судьба комбинированных систем, равно как и систем электроснабжения постоянным и однофазным переменным токами, была предрешена, и уже с 1901—1905 гг. в основном сооружаются трехфазные электростанции (рис. 7.1). Главной причиной успехов новой системы был быстрый рост промышленного потребления электроэнергии, тогда как построенные ранее станции удовлетворяли главным образом нужды населения. Поэтому первые трехфазные электростанции представляли собой чаще всего станции фабрично-заводского типа.

Русские электротехники сумели очень быстро оценить достоинства трехфазной системы. Уже в январе 1892 г. на четвертой Петербургской электротехнической выставке проф. И. И. Боргман демонстрировал трехфазные машины системы Доливо-Добровольского. На этой выставке работали две трехфазные машины мощностью по 15 кВт.

Первым в России предприятием с трехфазным электроснабжением был Новороссийский элеватор. Он представлял собой грандиозное сооружение, и задача распределения энергии по его этажам и различным зданиям могла быть решена наилучшим образом только с помощью электричества. Строитель элеватора инж. А. Н. Щенснович решил применить только что ставшую известной трехфазную систему. Летом 1892 г. швейцарскому заводу фирмы «Брун — Бовери» было заказано изготовление чертежей трехфазных машин. В следующем 1893 г. элеватор был электрифицирован. Интересно, что все машины по разработанным за границей проектам изготовлялись в собственных мастерских элеватора.

На электростанции, построенной рядом с элеватором, были установлены четыре синхронных генератора мощностью 300 кВА каждый. Таким образом, общая мощность электростанции составляла 1200 кВА, т. е. это была в то время самая мощная в мире трехфазная электростанция. В помещениях элеватора работали трехфазные двигатели мощностью 3,5—15 кВт, которые приводили в действие различные машины и механизмы. Часть энергии использовалась для освещения.

Представляет интерес электрификация Охтенского порохового завода в Петербурге. Ее организаторы — В. Н. Чиколев и Р. Э. Классон — решили осуществить передачу и распределение энергии с помощью трехфазных цепей. На гидроэлектростанции работали два генератора: один мощностью 120 кВт и другой 175 кВт. Оба генератора могли работать независимо друг от друга, так как были построены отдельные линии, но они могли включаться также и на параллельную работу. Наибольшее расстояние передачи составляло 2,66 км. На заводе находилось девять электродвигателей, из которых один имел мощность 65 л. с., три — по 20 л. с. и пять — 10 л. с. Кроме того, два двигателя по 1,5 л. с. были установлены на гидроэлектростанции для привода шитовых затворов. Часть энергии для питания дуговых ламп преобразовывалась в энергию постоянного тока.

Охтенская установка представляла собой в то время последнее слово техники. Ее основной строитель — выдающийся русский инженер Р. Э. Классон — дал прогрессивное инженерное решение задачи централизованного электроснабжения промышленного предприятия.

Первой в России электропередачей значительной протяженности была установка на Павловском приiske Ленского золотопромышленного района в Сибири. Электростанция была построена в 1896 г. на реке Ныгра. Здесь были установлены трехфазный генератор 98 кВт, 600 об/мин, 140 В и трансформатор соответствующей мощности, повышавший напряжение до 10 кВ. Электроэнергия передавалась на прииск, удаленный от станции на 21 км. На приiske для привода водотливных устройств использовались трехфазные асинхронные двигатели мощностью 6,5—25 л. с. (напряжение 260 В). Так постепенно расширялось в России строительство трехфазных электростанций.

С 1897 г. началась электрификация крупных городов (Москва, Петербург, Самара, Киев, Рига, Харьков и др.).

На рубеже XIX и XX вв. были уже достаточно выяснены преимущества и возможности трехфазной техники. Развитие городских сетей делало экономически нецелесообразным существование в одном городе многих мелких станций, и они закрывались одна за другой. Электрические станции становились крупными промышленными предприятиями по выработке электроэнергии; сети разных станций объединялись, создавались первые энергетические системы.

РАЗВИТИЕ ПЕРВИЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В СВЯЗИ С ЭЛЕКТРИФИКАЦИЕЙ

«Героический период» электротехники завершился на рубеже прошлого и текущего столетий. Все основные технические устройства, предназначенные для производства, распределения и использования электроэнергии, были предложены и доведены до промышленных масштабов применения пионерами электротехники в разных странах. Потребность в производстве больших количеств электроэнергии для электрификации оказала влияние на всю первичную энергетику: теплоэнергетику и гидроэнергетику. Коренные усовершенствования и в той и в другой областях первичной энергетики были теперь уже главным образом связаны не с непосредственным использованием в промышленности тепла и энергии падающей воды, а с созданием первичных двигателей электростанций. Впрочем,

несколько позднее тепловые электростанции стали рассматриваться как фабрики по производству электрической и тепловой энергии на равноправных началах (так называемые теплоэлектроцентрали — ТЭЦ).

Развитие котлостроения

Концентрация производства энергии, начавшаяся с переходом к электрификации, практически оказалась бы неосуществимой на основе старой первичной энергетики «доэлектрического» периода. Если в конце XIX в. крупные предприятия потребляли мощность в пределах 500—1500 л. с., то в начале XX в. предстояло обеспечить для некоторых заводов мощность уже примерно 30 тыс. л. с. Для решения этой задачи в условиях старой первичной теплоэнергетики нужно было бы установить более десятка мощных паровых машин и около сотни паровых котлов.

Для современной тепловой электростанции мощностью 1,2 млн. кВт, оборудованной теплотехническими устройствами конца XIX в., потребовалось бы более 3400 паровых котлов и грандиозные площади для их размещения; число паровых машин было бы равно 480. Таким образом, совершенно отчетливо проявилось типичное для развития техники противоречие: теплоэнергетика тормозила развитие электростанций, а поэтому рост станций решительным образом стимулировал развитие теплоэнергетики.

Трудно назвать другой технический объект, получивший столь коренные конструктивные изменения в первой половине XX в., как паровой котел. С другой стороны, трудно назвать другой технический объект, который подобно паровому котлу с момента своего возникновения и до наших дней, т. е. в течение двух с половиной столетий, развивался бы под действием только двух неизменных тенденций: повышение давления и повышение паропроизводительности. При этом, естественно, всегда было стремление повысить к. п. д. котла.

Под влиянием электрификации эти тенденции сильно обострились, направив внимание конструкторов и исследователей на физические факторы, определяющие напряженность работы котла: температуры и скорости газов, воды и пароводяной смеси. Поиски путей резкого повышения этих параметров и привели в первой половине XX в. к коренному изменению конструктивных форм котлоагрегата.

В этот период наблюдается значительный относительный рост топочных объемов, стремление к интенсификации процесса горения, к повышению его температуры и полноты сгорания топлива. Рост топочных объемов связан с переходом к камерному сжиганию топлива (в топках-камерах) вместо старого слоевого. Повышение температуры горения потребовало защиты топочных стен и сводов. Для этой цели стали применять топочные экраны, предложенные в конце XIX в. выдающимся русским инженером В. Г. Шуховым.

Конструкция водяного подогревателя (экономайзера) была усовершенствована. В последних ступенях регенеративного подогрева он стал работать под котельным давлением, восприняв на себя функцию подогрева воды почти до парообразования. Развитие конструкций экономайзеров представляло собой важный шаг на пути повышения к. п. д. парового котла.

В первой половине XX в. в отдельных котельных установках к. п. д. возрос с 50—60% до значений, превышающих 90%.

Для интенсификации процесса сгорания топлива в топку стали подавать воздух, предварительно нагретый в воздухоподогревателе до высокой температуры.

Если первые типы котлов имели один, два и до пяти барабанов, то в 30-х годах преобладающими становятся конструкции с одним барабаном или же совсем не имеющие барабанов. Уменьшение числа барабанов вызывалось тем, что с ростом котельного давления барабан становится самой дорогой частью котла. Кроме того, барабан стал играть роль водяного аккумулятора. Поперечное сечение котельных трубок уменьшилось (наружный диаметр со 100 до 40 мм, а внутренний с 90 до 32 мм), а это при одновременном увеличении их суммарной длины и длины контура усложнило задачу обеспечения циркуляции за счет разности плотностей воды и пароводяной смеси в нисходящих и восходящих

циркуляционных потоках. Потребовалось обеспечить принудительную циркуляцию, осуществляемую специальными циркуляционными насосами. Были разработаны конструкции с принудительной многократной циркуляцией и одним барабаном в качестве выравнивающей емкости, стали проектироваться безбарабанные котлы с принудительной однократной циркуляцией, давно предлагавшиеся многими изобретателями (так называемые прямоточные котлы). Такие конструкции сначала возникли в Германии в 20—30-х годах XX в. В СССР пионером в конструировании прямоточных котлов явился проф. Л. К. Рамзин. Первый крупный котел его конструкции производительностью 160 т пара в час при давлении 140 ат был установлен в 1934 г. на ТЭЦ № 9 Мосэнерго.

Таким образом, тенденции развития котлов в рассматриваемый период состояли во всемерной интенсификации протекающих в них процессов — увеличении топочных объемов, переходе от слоевого сжигания к факельному в топках-камерах; введении широко развитых радиационных поверхностей — экранов; увеличении «хвостовых» поверхностей нагрева (водяных и воздушных подогревателей); сокращении числа барабанов; введении принудительной циркуляции; освоении конструкций прямоточных безбарабанных котлов с однократной принудительной циркуляцией. С переходом к неаккумулирующим прямоточным котлам потребовалось осуществить автоматизацию управления котельными установками, точный и оперативный тепловой контроль, большую надежность их работы.

Особое значение приобретал сложный процесс приготовления топлива и водоподготовки. Размол и подсушка топлива для сжигания его в факелах в виде аэропыли потребовали разработки ряда дополнительных технических устройств: угольных мельниц, циклонов, труб-сушилок, дозаторов, транспортеров, горелок и приборов для контроля за их действием.

Для подготовки питательной воды, к чистоте которой предъявляются исключительно высокие требования, потребовалось создание водоподготовительных цехов со сложным фильтрационным и химическим оборудованием, лабораториями химического контроля за качеством питательной воды. Так, котельная из загрязненного и пыльного помещения, обслуживаемого кочегарами с низкой квалификацией и механиками с начальной технической подготовкой, превратилась в просторный и светлый зал со сложным оборудованием, работающим под автоматическим и лабораторным контролем, под наблюдением технических работников высокой квалификации.

Развитие паровых турбин

Ряд принципиальных вопросов турбостроения был поставлен и в частной форме разрешен еще в трудах шведского инженера Г. П. Лавалья.

Сторонник интенсификации техники и, в частности, увеличения скорости технических агрегатов, Лаваль довел ее до 6000—7000 об/мин в конструкции первого сепаратора непрерывного действия, запатентованного в 1878 г. Для непосредственного привода своего сепаратора в 1883 г. Лаваль предложил использовать простейшую турбину вида «эолопила Герона». Для увеличения к. п. д. турбины Лаваль использовал расширяющееся сопло (1889 г.), позволившее понизить давление пара ниже критического, сообщив ему при этом сверхзвуковую скорость. Сопло Лавалья позволило повысить начальное давление пара и тем самым увеличить экономичность парового двигателя.

Пойдя по пути освоения высоких скоростей, Лаваль создал активную одновечную турбину, т. е. турбину с одним рабочим колесом, которое вращалось с огромной скоростью (30 000 об/мин). В процессе конструирования этой турбины (рис. 7.2) Лаваль решил ряд сложных технических задач, используя такие технические

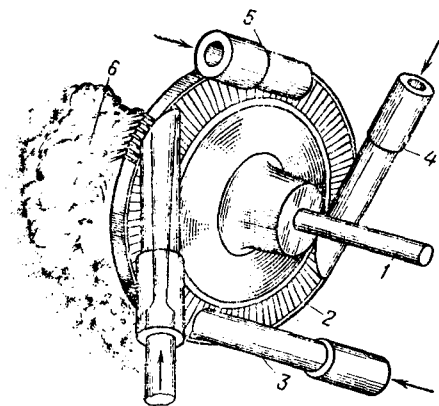


Рис. 7.2. Схема активной одновальной турбины Лавала:

1 — вал; 2 — рабочие лопатки; 3, 4, 5 — сопла; 6 — выход пара с рабочих лопаток

элементы, как гибкий вал с подшипниками на шаровых опорах, турбинное колесо (диск в форме тела равного сопротивления инерционным силам). Впервые для лопаток и дисков были применены специальные материалы (никелевая сталь), а также использован редуктор с системой шестерен.

Решения, предложенные Лавалем в области турбостроения, не имели теоретических обоснований и могли быть применены к частным случаям при конструировании турбин небольшой мощности (максимальная мощность турбины

Лавала была 500 кВт). Теория перечисленных задач еще только начинала разрабатываться. Теория расширяющегося сопла была дана Г. А. Цейнером (1899 г.), однако получила широкое признание значительно позднее, после опубликования работ ряда ученых, особенно чешского ученого А. Стодола. Им же была систематизирована теория гибкого вала и теория прочности. А. Стодолу считают создателем подлинной энциклопедии паровых турбин.

Малая мощность и довольно большой расход пара (8—9 кг/кВт·ч) в турбинах Лавала ограничили их применение областью привода маломощных агрегатов. Сейчас мы расцениваем эти турбины как первые машины, в которых были в частной форме решены основные задачи турбостроения и вместе с тем дано направление дальнейшим работам по освоению и совершенствованию принципиально нового типа парового двигателя.

Быстроходная паровая турбина, не имеющая частей, совершающих возвратно-поступательное движение, позволяла сконцентрировать громадные мощности в одном агрегате. Это свойство турбины могло быть использовано только при ее объединении с электрическим генератором.

В этом направлении начал свои работы английский инженер Ч. А. Парсонс. В 1884 г. он получил в Англии патент на многоступенчатую реактивную турбину мощностью около 8 кВт при скорости вращения 1000 об/мин. Соединив подобную турбину с валом электрического генератора, Парсонс получил первый турбогенератор — важнейший агрегат электростанции (рис. 7.3). Для уравнивания осевых усилий пар проводился в кольцевое пространство в средней части турбины, откуда через венцы подвижных и неподвижных лопаток проходил к концам турбины. Размеры всех лопаток были почти одинаковыми. В течение последующих 15 лет Парсонс строил паровые турбины самых разнообразных конструк-

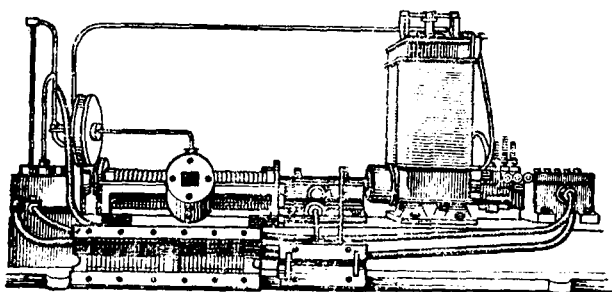


Рис. 7.3. Один из первых турбогенераторов Парсонса:
слева — турбина со снятой крышкой, справа — электрический генератор

ций, постепенно вводя новые улучшения, снижая расход пара, достигавший в первых образцах громадной величины, около $60 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$. Около 300 таких турбин было использовано для привода электрогенераторов. Турбины развивали мощность $60\text{—}75 \text{ кВт}$ при скорости вращения вала $4800\text{—}5000 \text{ об/мин}$. К 1896 г. в турбине мощностью 400 кВт был достигнут расход пара $9,2 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$. К этому году общая установленная мощность турбин составляла уже $40\,000 \text{ кВт}$.

Однако на европейском континенте паровые турбины получили всеобщее признание в качестве двигателя электрогенераторов только с 1899 г. В этом году в немецком городе Эльберфельде на электрической станции для привода трехфазных генераторов впервые были применены турбины Парсонса мощностью 1000 кВт . Заказ на английские турбины при высоком уровне строительства паровых машин в Германии приковал пристальное внимание мировой технической общественности к Эльберфельдской станции, испытание которой было поручено лучшим и авторитетнейшим немецким специалистам. Опубликованный ими в 1900 г. отчет установил неоспоримое преимущество паровой турбины перед другими типами двигателей, служившими для привода генераторов электрических станций. Турбины работали со средним давлением пара $10,5 \text{ ат}$, температурой 200°C и показали расход пара $8\text{—}9 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$ при полной нагрузке агрегата. Уже с 1913 г. расход пара в турбине Парсонса мощностью $25\,000 \text{ кВт}$, при давлении 14 ат и при температуре 304°C составил $5 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$.

Паровые турбины получают распространение во всех передовых в техническом отношении странах. В 1900 г. на Всемирной выставке в Париже французским профессором Огюстом Рато были представлены чертежи и детали многоступенчатой паровой турбины мощностью 1000 л. с. Эта турбина была ее автором подвергнута технической инверсии и превращена в осевые турбокомпрессоры и воздуходувки.

В 1903 г. швейцарский инженер Генрих Целли коренным образом усовершенствовал турбину Рато, уменьшив число активных сту-

пеней давления с 16—20 до 7—10, что в значительной степени упростило и удешевило турбину.

Разбивку скоростного перепада на ряд ступеней скорости ввел в 1896 г. американский инженер Чарльз Кертис.

Первые годы XX в. знаменуются началом турбостроения в ряде стран: Германии, Франции, США, Швейцарии, Швеции, Австро-Венгрии (на заводах Шкода в г. Брно, Чехословакия).

В дореволюционной России паровые турбины выпускались только Петербургским металлическим заводом (ныне Ленинградский металлический завод им. XII съезда КПСС). До 1917 г. завод выпустил всего 26 паровых турбин суммарной мощностью 9000 кВт с наибольшей мощностью отдельной турбины 1250 кВт. С началом внедрения паровых турбин на судах военно-морского флота был специально оборудован на Балтийском заводе в Петербурге турбинный цех, стоящий на одном уровне с турбинными цехами крупнейших зарубежных заводов.

Развитие гидравлических турбин

К началу XX в. в практике закрепились в основном два типа турбин: радиально-осевая и колесо Пельтона. Глубокие изменения во взглядах на возможности гидроэнергетики произошли в связи с опытами, поставленными во время Франкфуртской выставки 1891 г. С этого момента началась новая эра в области генерирования электрической энергии на гидравлических электростанциях. Для характеристики водяных турбин был введен коэффициент быстроходности, который определял число оборотов данного типа турбины при напоре 1 м и мощности 1 л. с. В первых радиально-осевых турбинах он равнялся 60—70 об/мин, а к концу XIX в. возрос до 320 об/мин. Некоторые инженеры пытались доказать, что коэффициент быстроходности ни при каких условиях не может быть больше 350 об/мин, но практика опрокинула эти предположения. Для повышения коэффициента быстроходности стали стремиться распределить мощность между несколькими рабочими колесами. Появились горизонтальные и вертикальные турбины сдвоенного типа. Но это был не единственный путь повышения коэффициента быстроходности. В 1914 г. проф. Дубс (Швейцария) доказал, что при значительном увеличении зазора между направляющим аппаратом и рабочим колесом и одновременном уменьшении длины лопаток рабочего колеса можно довести коэффициент быстроходности до 500 в обыкновенной (несдвоенной) турбине. Но при рабочем колесе с неподвижными лопатками при такой реконструкции нельзя было сохранить высокий к. п. д. Значительное увеличение коэффициента быстроходности было достигнуто в 1914—1916 гг., когда проф. В. Каплан (Чехословакия) осуществил радиальный подвод воды в направляющий аппарат и осевое прохождение воды через рабочее колесо при большом зазоре между направляющим и рабочим колесами.

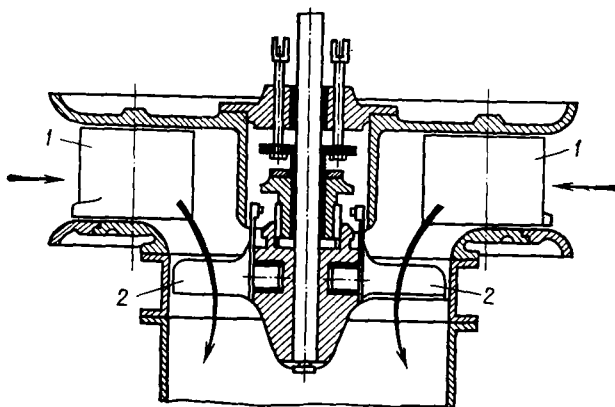


Рис. 7.4. Гидротурбина В. Каплана:
1 — направляющие лопасти; 2 — рабочее колесо с поворачи-
вающимися лопастями

Гидравлические турбины, предложенные Капланом (рис. 7.4) для низконапорных установок, в процессе своего развития прошли две стадии.

Стремясь устранить всякие детали, могущие усложнить прохождение воды через рабочее колесо, Каплан в патенте 1916 г. предложил турбину без обода и придал рабочему колесу форму судового гребного винта. Коэффициент быстроходности достиг 1000, к. п. д. имел значение 80—82% при полном открытии турбины, которое регулировалось поворотными лопатками направляющего аппарата. Однако испытания показали, что при неполном подводе воды к рабочему колесу к. п. д. резко падает. Вследствие этого был предложен поворотный тип лопаток рабочего колеса. Изменение поворота лопаток вначале производилось от руки, а затем было автоматизировано и увязано с работой поворотных лопаток направляющего аппарата, которые регулировались также автоматически. В окончательном виде турбина стала получать все более широкое применение на практике. В настоящее время турбины этого типа называются поворотнлопастными. Образцами передовой техники могут считаться мощные радиально-осевые, горизонтальные (капсульные) и поворотнлопастные турбины.

После Днепровской ГЭС им. В. И. Ленина, на которой были установлены американские и советские турбины, отечественное гидротурбостроение неизменно занимает ведущее место в мире. Так, исключительно удачными оказались радиально-осевые турбины мощностью 65 МВт для Гюмушской ГЭС с заново разработанной проточной частью для высокого напора. Самые крупные в мире поворотнлопастные турбины с диаметром рабочего колеса 10,3 м установлены на Саратовской ГЭС. Рекордные мощность (126 МВт) и к. п. д. (94%) были достигнуты в поворотнлопастных турбинах крупнейших Волжских ГЭС (им. В. И. Ленина и им. XXII съезда

КПСС). Создание этих турбин было отмечено V Мировой энергетической конференцией в Вене в 1956 г. как высшее достижение мирового гидротурбостроения.

Представляют интерес турбины крупнейших в мире Братской и Красноярской ГЭС. На Братской ГЭС им. 50-летия Великого Октября установлены радиально-осевые гидротурбины с диаметром рабочего колеса 5,5 м и развивающие при напоре 100 м мощность 230 МВт. Радиально-осевые турбины Красноярской ГЭС с диаметром рабочего колеса 7,5 м при таком же, как в Братске, напоре развивают мощность 508 МВт. Гидротурбины Саянской ГЭС будут при напоре 194 м развивать мощность 650 МВт.

В последние годы в нашей стране созданы новые типы гидротурбин: горизонтальные капсульные, двухперовые и диагональные. Горизонтальные капсульные агрегаты размещаются в теле водосливной плотины, что уменьшает размеры и стоимость сооружений. Такие агрегаты установлены в 1964—1965 гг. на Киевской ГЭС (при напоре 7,7 м мощность 16,3 МВт), на Череповецкой ГЭС (10,5 м, 20 МВт) и самые мощные в мире горизонтальные капсульные агрегаты с диаметром рабочего колеса 7,5 м установлены на Саратовской ГЭС (10,6 м, 45 МВт).

В 1961 г. на Ленинградском металлическом заводе им. XXII съезда КПСС впервые в мире была создана (для Уч-Курганской ГЭС с напором 36 м) гидротурбина с двухперовыми рабочими колесами. Перспективными являются предложенные в СССР проф. В. С. Квятковским диагональные поворотлопастные турбины, в которых ось поворота лопастей располагается под острым углом к оси вращения рабочего колеса. Опытная диагональная турбина мощностью 77 МВт установлена на Бухтарминской ГЭС.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ РАЙОННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Перевозка по железным дорогам топлива, особенно его низкокалорийных сортов, экономически невыгодна. Гораздо удобнее было строить крупные электростанции на месте добычи топлива, на водопадах или на крупной реке, а вырабатываемую энергию транспортировать по линиям электропередачи в промышленные районы и города. Трехфазная техника позволяла полностью решать эту проблему. Такие электростанции, расположенные непосредственно у источников энергии, стали называть районными.

Первые районные электростанции были построены во второй половине 90-х годов прошлого столетия, а в текущем столетии они составили основу развития электроэнергетики. Первой районной электростанцией считают Ниагарскую ГЭС.

В последней трети прошлого века стали разрабатываться проекты электрической передачи энергии Ниагарских водопадов. В 1889 г. была образована компания, которая приобрела право использования мощности 450 000 л. с. и приступила к подготовке строительства гидроэлектростанции. Совещание крупных инженеров и ученых, созванное для обсуждения вариантов проектов будущей стан-

ции, согласилось с предложением применить двухфазную систему Тесла.

Фирме «Вестингауз Электрик» были заказаны три двухфазных генератора по 5000 л. с. каждый с напряжением 2400 В, а другой фирме — гидротурбины по 5150 л. с. В короткий срок были выполнены большие строительные работы, и в ноябре 1896 г. невиданная до тех пор по размерам и мощности электростанция была открыта.

Еще в период строительства Ниагарской ГЭС выяснилось, что спрос на электроэнергию в этом районе будет очень велик и проектная мощность станции окажется недостаточной. Поэтому сразу же началось расширение станции, и к началу текущего столетия число агрегатов было увеличено до восьми, а общая мощность возросла до 40 000 л. с. На рис. 7.5 показан машинный зал Ниагарской гидроэлектростанции, который и сегодня выглядит вполне современным.

Пример с Ниагарской электростанцией показывает, что с первых шагов крупного гидроэлектростроительства дешевая энергия гидроэлектростанций получила широкое применение для электрохимических и электротермических процессов (производство алюминия, карборунда, карбида кальция и др.), т. е. там, где электроэнергия играет роль основного технологического фактора.

Широкое развитие строительство районных электростанций приобрело с начала XX в. Этому способствовал рост потребления электроэнергии, связанный с внедрением в промышленность электропривода, с развитием электрического транспорта и с расширением масштабов электрического освещения городов.

Мощности районных электростанций быстро возрастали от нескольких десятков тысяч киловатт (до первой мировой войны) до 100 000 кВт (после войны). Так, в 1921—1922 гг. в 6 км от Парижа была построена районная электростанция «Женевиллье»; мощность ее первой очереди составила 200 000 кВт, но было предусмотрено расширение до 320 000 кВт. В середине 20-х годов в США была построена электростанция «Ист-Ривер» с тремя агрегатами по 60 тыс. кВт, а на немецкой станции «Клингенберг» (1927 г.) были установлены три агрегата по 80 тыс. кВт. Современные действующие и строящиеся крупные районные электростанции имеют мощность, превышающую 2 млн. кВт (тепловые) и 4—5 млн. кВт (гидравлические).



Рис. 7.5. Машинный зал Ниагарской гидроэлектростанции

В России первой районной станцией была небольшая гидроэлектростанция «Белый уголь» (вблизи г. Ессентуки), построенная в 1903 г. Эта электростанция по четырем воздушным трехфазным линиям протяженностью 6—20 км питала города минераловодской группы.

Единственной крупной районной электростанцией дореволюционной России была станция «Электропередача» в г. Богородске (ныне г. Ногинск), сооруженная на средства «Общества электрического освещения 1886 г.». Руководителем строительства станции и ее сети был Р. Э. Классон. На станции были установлены три турбогенератора по 5000 л. с., 1500 об/мин, 6600 В, 50 Гц. Напряжение повышалось при помощи трансформаторной группы до 70 кВ. Линия передачи Богородск — Москва имела протяженность более 70 км, и в конце ее, в Измайлове (Москва), была построена понижающая подстанция. В Москве, на территории завода Гужона (теперь «Серп и молот»), линия Измайловской подстанции была соединена с городской сетью несколькими кабелями. Так в Москве была создана первая, еще несовершенная электрическая система, включающая в себя две электростанции (на Раушской набережной и в Богородске), сети которых были соединены на их периферии.

Богородская электростанция, сданная в эксплуатацию в 1914 г., явилась для своего времени самой крупной в мире электростанцией на торфе. Эта станция питала электроэнергией важнейшие предприятия Москвы в тяжелые годы гражданской войны. После Великой Октябрьской социалистической революции в СССР крупные районные электрические станции стали основным звеном электрификации.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Современный этап развития комплексной энергетики характеризуется созданием крупных энергетических систем. Под энергетической системой понимают совокупность электростанций, линий электропередачи, подстанций и тепловых сетей, связанных общностью режима и непрерывностью процесса производства и распределения электрической и тепловой энергии. Схема на рис. 7.6 дает представление об энергетической системе и примерном распределении энергии между электростанциями и видами потребления.

До появления районных электростанций электрических систем практически не было. Электростанции работали изолированно, каждая имела свою нагрузку. Этому обстоятельству электроэнергетика начала XX в. была обязана теми неисчислимыми трудностями, которые вытекали из многообразия параметров отдельно работавших станций. Действительно, при изолированной работе станций не было большой необходимости устанавливать стандартные частоты и напряжения, и последние принимались в зависимости от конкретных условий данной станции. Последствия этого еще долго сказывались в некоторых странах: например, в США и Японии приходилось подключать на параллельную работу электростанции,

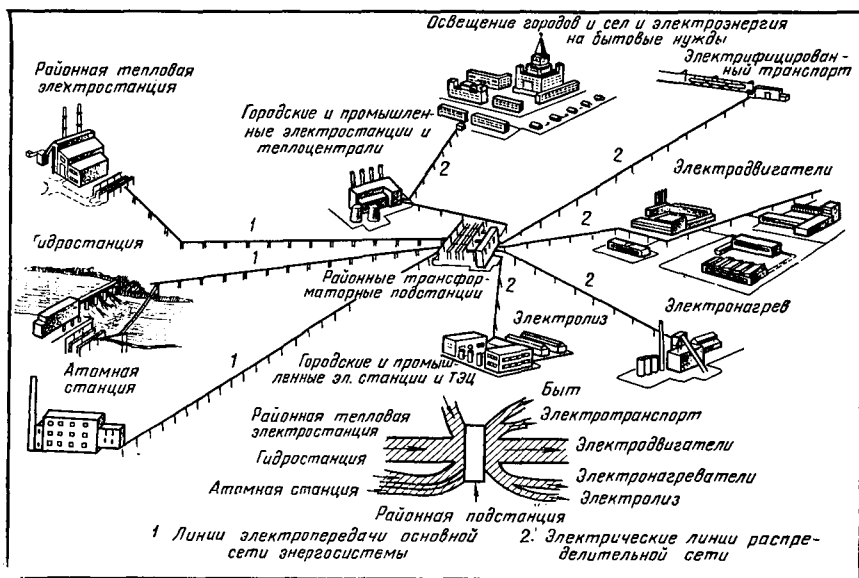


Рис. 7.6. Схематическое изображение энергосистемы и распределение энергии между электростанциями и потребителями

работавшие при различных частотах (50 и 60 Гц). Потребность объединить работу нескольких электростанций на общую сеть стала проявляться уже в 90-х годах прошлого столетия. Было выяснено, что при совместной работе уменьшается необходимый резерв на каждой станции в отдельности, появляется возможность ремонта оборудования без отключения основных потребителей, создаются условия для выравнивания графика нагрузок базисных станций, для более эффективного использования энергетических ресурсов.

Включение на параллельную работу электростанций постоянного тока не вызывало особых затруднений, если эти станции имели одинаковые напряжения и были расположены недалеко одна от другой. Но нередко нужно было объединять работу станций, расположенных в районах, удаленных друг от друга. Низкое напряжение, принятое на станциях постоянного тока, не позволяло осуществить непосредственное их соединение линиями постоянного тока. В таком случае приходилось прибегать к преобразованию постоянного тока в переменный ток высокого напряжения. На электростанциях устанавливались двигатель-генераторные преобразователи, и станции связывались между собой линией переменного тока.

Первое известное объединение двух трехфазных электростанций было осуществлено в 1892 г. в Швейцарии. Две небольшие электростанции — в Глэдфельдене (120 кВ·А) и Гохфельдене (360 кВ·А) — соединялись 2-километровой линией 5 кВ и питали распределительную сеть завода фирмы «Эрликон» по линии пере-

дачи протяженностью 24 км при напряжении 13 кВ. Возбуждение генераторов первой станции регулировалось со щита управления второй.

Однако в первое десятилетие после этого опыта объединение электрических станций еще не получило заметного развития. Только с возникновением крупных районных электростанций, особенно после 1900 г., этот процесс стал определяющим для прогресса электроэнергетики. Так, в 1905 г. в США уже работали три крупные для того времени энергетические системы: Южно-Калифорнийская, в районе Сан-Франциско и в штате Юта. Первая из этих систем (компания Эдисона) объединяла четыре гидравлические станции и четыре тепловые с общей установленной мощностью около 12 тыс. кВт. Сеть этой системы напряжением 2—30 кВ имела общую протяженность 960 км и охватывала 18 городов. В системе применялись синхронные компенсаторы.

В России до Великой Октябрьской социалистической революции действовали две небольшие системы. Одна из них находилась на юге, где довольно разветвленная кабельная сеть 20 кВ питалась от двух бакинских электростанций, мощность которых к 1914 г. достигла 36,5 и 11 тыс. кВт. Другая, упоминавшаяся выше московская система включала в себя две станции: Московскую городскую (ныне 1-я МГЭС) и станцию «Электропередача» (ныне ГРЭС имени Классона). На западе в это время уже создавались более крупные системы. В Германии была образована Рейнская система, которая впоследствии превратилась в Рейнско-вестфальскую энергетическую систему, одну из наиболее крупных в мире. Энергосистема четырех южных штатов США (Джорджия, Северная Каролина, Южная Каролина и Теннесси) к 1914 г. уже объединила электростанции суммарной мощностью 230 000 кВт и простиралась с востока на запад на 1500 км.

ЗАРОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА, ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Как известно, одними из наиболее распространенных в промышленности являются механические процессы. Поэтому уже в 70—80-х годах прошлого столетия начинает проявляться стремление электрифицировать эти процессы, т. е. осуществить электрический привод различных исполнительных механизмов. Однако до начала 90-х годов применение электропривода носило эпизодический характер. Лишь в некоторых случаях, когда предприятия располагали блок-станциями для электрического освещения, электродвигатели применялись для привода вентиляторов, насосов, подъемников и других механизмов.

Положение изменилось коренным образом в связи с изобретением асинхронного двигателя. В достаточно короткий срок этот тип двигателя занял доминирующее положение в системе электропривода промышленных предприятий. Можно сказать, что именно асинхронный трехфазный электродвигатель и вызвал к жизни ту

отрасль электроэнергетики, которая получила наименование «электропривод».

Одним из важнейших преимуществ асинхронного двигателя перед двигателями постоянного тока является отсутствие у него коллектора. Чрезвычайная простота асинхронного двигателя, особенно с короткозамкнутым ротором, его надежность и невысокая стоимость позволяют установить в любом цехе сотни и тысячи двигателей при небольшом обслуживающем персонале. Такие двигатели могут выполняться в герметических корпусах, и, следовательно, их можно использовать в тяжелых условиях: в атмосфере повышенной влажности, бензиновых паров и т. п. Асинхронные двигатели без повреждений выдерживают значительные кратковременные перегрузки, тогда как в двигателях постоянного тока любая перегрузка разрушительным образом сказывается на коллекторе.

Существенным недостатком асинхронного двигателя является трудность регулирования его скорости. Поэтому до настоящего времени еще очень велик удельный вес регулируемых машин постоянного тока в системе промышленного электропривода. Недостатком асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором также является ограничение их мощности условиями пуска. Это обстоятельство в начальный период развития трехфазной техники, когда мощности электрических станций были невелики, заставляло во многих случаях отказываться от применения двигателей с короткозамкнутым ротором. Мощные двигатели с короткозамкнутым ротором применялись только в случаях, когда они питались от отдельного генератора. Такие установки часто устраивались, например, в водокачках.

Были сделаны некоторые попытки повысить мощность двигателей с короткозамкнутым ротором. Так, в 1892 г. М. О. Доливо-Добровольский разработал метод автотрансформаторного пуска асинхронных двигателей, т. е. пуска при пониженном напряжении, но при этом значительно (пропорционально квадрату напряжения) уменьшался вращающий момент. В 1893 г. Доливо-Добровольский изобрел ротор с двойной беличьей клеткой. Эти изобретения получили некоторое распространение. Однако наиболее совершенный с точки зрения пусковых характеристик тип ротора с двойной беличьей клеткой, равно как и ротор с глубоким пазом, получили весьма широкое развитие только в 20-х годах текущего столетия. Основным типом асинхронного двигателя большой мощности в 90-х годах прошлого и начале текущего столетий оставался двигатель с фазным ротором. Он был удобен еще и потому, что позволял в случае необходимости регулировать скорость при помощи реостатов, хотя при этом терялась значительная мощность.

В конце 90-х годов уже выпускали асинхронные электродвигатели в значительном количестве и с большим диапазоном мощностей. Характеристики этих электродвигателей были вполне удовлетворительными (например, асинхронные двигатели фирмы АЕГ мощностью 5 л. с. имели к. п. д. 85%, а $\cos \varphi$ выше 0,9).

Электрификация вытесняла из системы промышленного привода паровую машину. Паровой двигатель производственных цехов переходил в машинные залы электростанций, становясь первичным двигателем, дающим энергию вторичным двигателям — электрическим.

Практически развитие электропривода происходило двумя неравнозначными путями. Первый, наиболее типичный путь — замена паровых двигателей, работавших на трансмиссию. Это был путь возникновения крупногруппового электропривода, который не исключал тяжелых производственно-гигиенических условий, определявшихся наличием трансмиссий. Второй путь — эпизодическое применение одиночного привода. Последнее, как правило, имело место только в случаях крупных ответственных исполнительных механизмов, предъявлявших специфические требования к приводному двигателю (привод кранов, центрифуг, прокатных станов и пр.). Но уже в конце 90-х годов XIX в. практика наглядно убеждала в преимуществах одиночного привода.

Последний вид привода освобождает промышленное предприятие от трансмиссий и, главное, позволяет работать каждому отдельному исполнительному механизму при переменных нагрузках и наивыгоднейших скоростях, а также позволяет ускорить процесс пуска в ход и изменение направления вращения. Одиночный привод оказал существенное влияние и на конструкцию самого исполнительного механизма. Сближение приводного двигателя с исполнительным механизмом иногда получалось настолько тесным, что конструктивно они представляли собой единое целое. Например, в случае электропривода рольганга ролик, служащий для перемещения металла, является наружным ротором асинхронного двигателя.

В 70-х и особенно 80-х годах проводилось много работ по применению электричества для целей тяги. Так называемые конно-железные дороги уже не удовлетворяли возросших потребностей городского населения, а применение парового городского транспорта оказалось неприемлемым вследствие дыма и копоти. Электрический городской транспорт все более становится предметом технической разработки и изучения. Реальная возможность для проведения опытов по электрификации транспорта появилась после изобретения генератора Грамма.

Во всех случаях, когда электрическая энергия для питания тягового двигателя генерировалась гальванической батареей, техническое решение шло в направлении создания автономных устройств тяги, т. е. таких, в которых как генерирующая установка, так и электродвигатель были размещены на том самом экипаже или судне, которое должно было приводиться в движение. Когда же для выработки электроэнергии стали применять генераторы Грамма, приводимые в действие соответствующими паровыми агрегатами, система электрической автономной тяги перестала распространяться. Проблема электрической тяги могла найти свое решение лишь при условии разработки приемов экономичной передачи электроэнергии от места ее генерирования к движущемуся экипажу,



Рис. 7.7. Электрическая железная дорога В. Сименса (1879 г.)

вагону и т. п. Таким образом, электрическая тяга могла развиваться в виде неавтономной тяги с применением методов экономичной передачи электроэнергии на расстояние.

Система автономной электрической тяги, однако, не была полностью отвергнута; усовершенствование аккумуляторов позволило устраивать систему автономной тяги, пользуясь смонтированной в вагоне или на судне аккумуляторной батареей, током от которой питался электродвигатель. В начале XX в. получила развитие автономная «теплоэлектрическая тяга».

В 1879 г. В. Сименсом была построена первая небольшая электрическая железная дорога на промышленной выставке в Берлине (рис. 7.7). Электрическая энергия по отдельному контактному рельсу передавалась к двигателю небольшого вагона, напоминавшего собой современную аккумуляторную тележку (электрокар); обратным проводом служили рельсы, по которым двигался «локомотив». К последнему были прицеплены три тележки, на которых могли разместиться 18 пассажиров.

Первые опыты неавтономной электрической тяги в России были произведены Ф. А. Пироцким. Еще в 1875—1876 гг. он использовал для передачи электроэнергии обычный железнодорожный рельсовый путь. Чтобы улучшить проводимость рельсового пути, он применил стыковые электрические соединения, а для усиления изоляции друг от друга двух ниток рельсов одной колесной пары (они были изолированы через слой окалины и шпалы) — смазку подошвы рельсов асфальтом.

В августе 1880 г. Пироцкий осуществил пуск электрического трамвая на опытной линии в районе Рождественского парка конной железной дороги в Петербурге. Электроснабжение этой линии производилось от небольшой электростанции, построенной в парке,

с генератором мощностью 4, а позднее 6 л. с. Под трамвайный электровагон был приспособлен двухъярусный вагон конной железной дороги (вес с пассажирами 6,5—7,0 тс), к раме которого был подвешен электродвигатель, приводивший в движение ведущую ось через двухступенчатую зубчатую передачу. Схема питания электроэнергией трамвайной линии, предложенная Пироцким, некоторое время применялась для питания трамвайной сети за рубежом. Она была удобна благодаря своей простоте и давала возможность обойтись без третьего рельса, затруднявшего уличное движение или усложнявшего все сооружение. Недостатком такой схемы было наличие больших потерь электроэнергии от токов утечки из-за плохой изоляции рельсов.

После изобретения способа питания от верхнего контактного провода, сделанного в 1883 г. независимо Ван-Депулем (США) и В. Сименсом (Германия), схема питания по двум рельсам перестала применяться на электротранспорте, если не считать ее применения в настоящее время для автоблокировки. Заслугой Пироцкого является также введение зубчатой передачи (вместо ременной) от вала двигателя к движущимся колесам. В 1889 г. подобный же передаточный механизм, получивший название «трамвайного привода», был применен Спрэгем в США.

Первоначальное техническое решение проблема электрического трамвая получила в 1881 г. С 1883 г. действовала линия трамвая в Портуме (Ирландия) длиной 9,6 км; в 1884 г. были открыты для эксплуатации трамвайные линии в Брайтоне (Англия) длиной 1,5 км и во Франкфурте-на-Майне длиной 6,56 км. Первый трамвай в России — киевский — был пущен для общего пользования в 1892 г., причем решение о строительстве трамвайной линии было принято лишь после того, как убедились, что ни конная, ни паровая тяга не способны преодолеть крутой подъем от Подола к Крещатику. Только трамвай соединил густонаселенную окраину Киева с центром города.

На электрическом транспорте почти исключительное применение получил постоянный ток, обеспечивавший надежную работу тяговых электродвигателей и удобное регулирование их скорости. Поэтому по мере развития техники переменного тока пришлось сооружать преобразовательные подстанции.

Наиболее естественным и поэтому первым по времени преобразователем переменного тока в постоянный была двигатель-генераторная установка. В 1885—1889 гг. создаются первые одноякорные преобразователи переменных токов в постоянный, которые в каждом случае представляли собой комбинацию синхронного электродвигателя и генератора постоянного тока с общим якорем. Одноякорный преобразователь обладает рядом существенных преимуществ перед двигатель-генераторной установкой: снижение на 30—40% веса, значительная экономия места (до 50%), высокий к. п. д. Одноякорные преобразователи в 90-х годах прошлого и начале настоящего столетий получили очень широкое распространение, особенно в тяговых установках, однако позднее, уже в 20-х го-

дах, они начали вытесняться новым мощным средством преобразовательной техники — ионными, а в последнее время — тиристорными преобразователями.

Централизованное производство электроэнергии позволило в широких масштабах приступить к электрификации городского и пригородного транспорта; расширяется электрификация заводских и рудничных железных дорог. Однако очень скоро стало ясно, что трамвайный транспорт не может полностью удовлетворить потребность в быстром перемещении огромных масс людей в крупнейших промышленных центрах. Значительно увеличить скорость и удобство пассажирских перевозок удалось путем сооружения метрополитенов (надземных и подземных железных дорог).

В 1893 г. была предпринята постройка большой надземной электрической железной дороги в Берлине, которая проектировалась В. Сименсом еще в 1879 г. Рельсы этой железной дороги были уложены по эстакаде, протянувшейся вдоль широких улиц. Другая надземная железная дорога, соединявшая ряд промышленных городов от Эльберфельда до Бармена (Германия), отличалась от берлинской тем, что рельсы, по которым двигался вагон, находились над ним, т. е. вагон «подвешивался» на двух или четырех колесах.

Более удачной с точки зрения внешнего вида улиц, увеличения пропускной способности, уменьшения шума и пр. оказалась подземная дорога. Подземные дороги с паровой тягой строились еще до 90-х годов прошлого века (например, метрополитен в Лондоне, который был переведен на электрическую тягу в 1890 г.). Одной из первых подземных железных дорог, которая сразу строилась как электрическая, явился метрополитен в Будапеште (1896 г.). Сооружение его велось открытым способом: вдоль улицы вырывали глубокую канаву, бетонировали ее дно и стенки, а затем закрывали сверху железными балками и, соорудив заново мостовую, восстанавливали прежний вид улицы.

Впоследствии для метрополитена стали строить туннели глубокого залегания под землей.

Вслед за первыми опытами электрификации городского транспорта уже в 90-х годах прошлого века делались попытки перевести на электротягу сначала пригородные, а затем и магистральные железные дороги с большой плотностью движения. Перспектива перевода на электротягу пригородных и магистральных железных дорог была весьма заманчивой: электрический транспорт дает возможность равномерно распределять мощность двигателей по длине поезда (так называемые мотор-вагонные секции), что позволяло увеличить общий вес поездов, а также скорость, даже при коротких длинах перегонов.

Развитие автономного электротранспорта нашло свое продолжение в появлении тепловозэлектрической тяги. Этот вид транспорта, на котором сохраняются все преимущества электрической тяги при первичном тепловом двигателе (дизель), открывал чрезвычайно большие возможности. Тепловоз, например, является гораздо более экономичным и более автономным локомотивом, чем паровоз. Впер-

вые теплоэлектрическая тяга была осуществлена в 1903—1904 гг. для привода нефтеналивных барж «Вандал» и «Сармат», построенных Сормовским заводом.

В России до Великой Октябрьской социалистической революции электрификация железных дорог не получила развития, несмотря на многочисленные проекты и выступления передовых русских деятелей, предлагавших электрифицировать важнейшие участки железных дорог. Даже начавшаяся электрификация дороги Петербург — Ораниенбаум не была завершена из-за Первой мировой войны. Остались нереализованными несколько проектов сооружения электрифицированных железных дорог на Кавказе и в том числе электрификации участка Закавказской железной дороги на Сурамском перевале (проект был осуществлен после Великой Октябрьской социалистической революции). Теплоэлектрическая тяга в дореволюционной России практически не получила никакого распространения.

Единственной областью применения электрической тяги в России был трамвай. С 1892 по 1900 г. трамвайное движение было открыто в 12 городах России; всего до революции в России действовали 36 трамвайных предприятий в 35 городах. Сравнительно быстрое для дореволюционной России распространение трамвая объясняется значительно ускорившимся в конце XIX и начале XX вв. ростом городского населения, связанным с быстрым развитием капиталистического производства. Так, с 1840 по 1915 г. городское население в России увеличилось почти в 5 раз.

Громадное значение в развитии производительных сил сыграли новые отрасли промышленного производства, появление которых обуславливалось применением электрической энергии в качестве основного технологического фактора: промышленная электрохимия и электротермия.

Промышленная электрохимия зародилась вместе с гальванотехническими мастерскими и предприятиями по производству электролитическим путем кислорода и водорода.

Чтобы представить значение возникновения электротермии в конце прошлого века, достаточно напомнить, что алюминий благодаря электротехнологии перестал быть драгоценным металлом. Уже в 1898 г. работало восемь заводов по производству алюминия, в том числе крупнейшие заводы у Ниагарского и Рейнского водопадов, дававших дешевую энергию. Вслед за металлургией алюминия начинает развиваться ряд других электротермических производств. В конце прошлого века был найден способ получения карборунда. Тогда же был разработан метод получения карбида кальция, который стал потребляться в больших количествах для выработки ацетилена. Позднее были изобретены и усовершенствованы различные конструкции электрических печей для электрометаллургии. Возникла новая отрасль металлургии — производство высококачественных сталей.

Важной областью применения электрической энергии явилась электрическая сварка. Еще в конце 60-х годов были проведены опыты использования электрического тока для сварки металлов. На Парижской выставке 1867 г. демонстрировался способ контактной сварки: электрический ток пропускался через два металлических предмета, плотно приложенных друг к другу и имевших соприкосновение в нескольких точках. Однако этот метод не получил

тогда практического распространения вследствие своего несовершенства.

Другим направлением в области электросварки явилось использование тепла электрической дуги. Первое решение этой проблемы принадлежит русскому изобретателю Н. Н. Бенардосу, положившему начало технике дуговой электросварки, которая нашла затем широкое применение в технологии. В 1886 г. Бенардос оформил свое изобретение русской привилегией, и его метод дуговой электросварки под названием «электрогефест» вошел в практику. Один полюс источника энергии, согласно методу Бенардоса, соединялся с угольным либо графитовым электродом, а другой — со свариваемым металлом (рис. 7.8, а). В зону электрической дуги вводился металлический стержень, который расплавлялся, застывал и сваривал предметы. Бенардос ввел различные усовершенствования в свой метод, в частности, он указывал, что вместо угольного электрода можно использовать другие проводники, в том числе и металлы.

Иной способ сварки металлов был предложен Н. Г. Славяновым, который получил в 1891 г. привилегии на так называемую электрическую отливку металлов и электрическое уплотнение металлических отливок, в основу которых, как и в основу метода Бенардоса, было положено явление электрической дуги.

Свариваемое металлическое изделие (рис. 7.8 б) соединялось с одним полюсом источника электрической энергии, а с другим — металлический стержень, закрепленный в «плавильнике». Электрическая дуга, появляющаяся между металлическим стержнем и свариваемым предметом, расплавляет металл, и поверхность обрабатываемого предмета соединяется (сливается) с наливаемым металлом, образуя после застывания прочное соединение.

Н. Г. Славянов создал полуавтомат для металлического электрода — «плавильник», которым обеспечивалось регулирование длины дуги. Этот «плавильник» является предшественником автоматических сварочных установок. Славяновым была также предусмотрена шлаковая защита расплавленного металла от воздействия окружающей среды; им применялись присадки различных ферросплавов. «Электрогефест» и «электрическая отливка металлов» по-

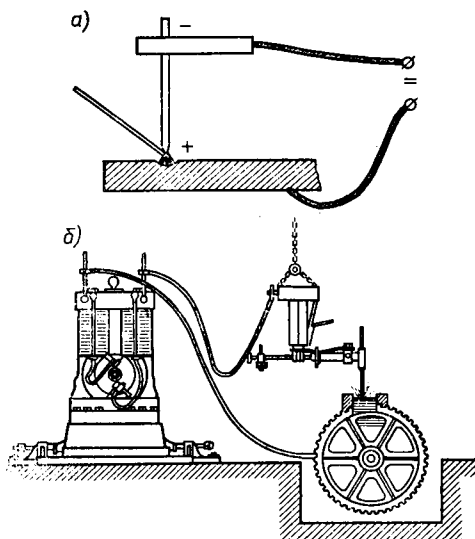


Рис. 7.8. Схема дуговой электросварки:
а — по способу Н. Н. Бенардоса; б — по способу
Н. Г. Славянова

лучили широкое применение в России и в особенности на заводах Германии, Франции и Англии.

В этот же период начинает развиваться электрометаллургия. Комбинированием различных химических реакций с методами электролиза было освоено промышленное производство меди, алюминия, цинка. Опыты по применению электрических дуговых печей для плавки руд, металлов и других веществ начались еще в конце 40-х годов, но лишь в 1878 г. Сименсу удалось придать такую конструкцию дуговой печи, что она могла использоваться на производстве, в частности, для восстановления металлов из руд.

Отдельное направление в области электронагрева составило применение токов высокой частоты для выделения тепла непосредственно в обрабатываемом материале. По мере роста производства электроэнергии и ее удешевления электротермические процессы стали находить все большее применение на практике.

Постепенно электрификация захватывала все новые отрасли производства, проникала в сельское хозяйство, быт, медицину. Этот процесс углублялся и расширялся, электрификация принимала массовый характер. Начинался современный этап развития энергетической техники.

РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ ПРОИЗВОДСТВА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ. РАЗВИТИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Тепловая часть электрических станций на каждом этапе своего развития определялась прежде всего техническим уровнем основных агрегатов теплоэнергетического оборудования: паровых котлов и паровых двигателей. В зависимости от мощности, параметров и габаритов этого оборудования решались вопросы компоновки станций, в развитии которых можно выделить четыре этапа (рис. 8.1).

Первый этап характеризуется применением ручных топок со слоевым сжиганием топлива на плоских колосниковых решетках, расположенных под котлами различных старых типов (от жаротрубных до горизонтальных водотрубных). Паропроизводительность котлов 3 т/ч и мощность паровых двигателей — 5000 кВт. Применялся пар давлением до 15 ат с перегревом до 300°С. Этот этап для наиболее развитых в экономическом отношении стран относится в основном к концу XIX в.

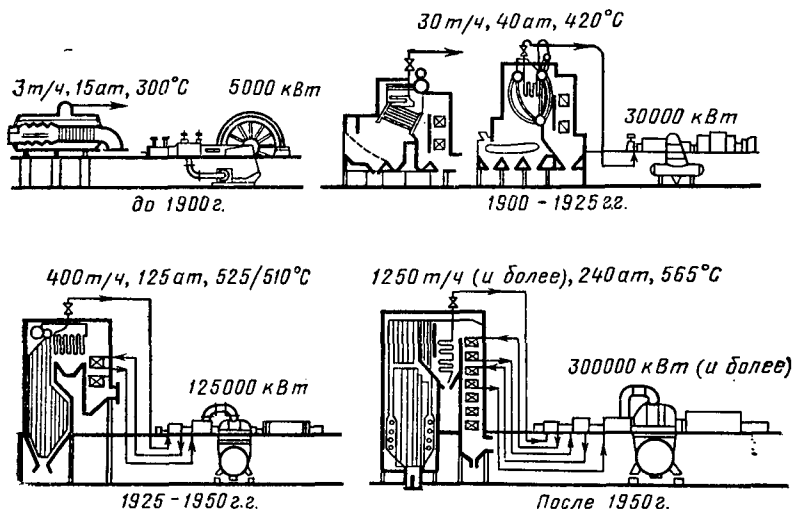


Рис. 8.1. Схемы, отражающие четыре периода развития тепловой части электрических станций

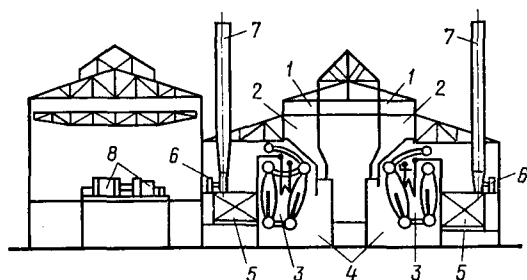


Рис. 8.2. Схема компоновки электростанции «Электропередача»

ных углей — топок с цепными решетками. Второе направление — переход к водотрубным котлам с меньшим диаметром барабанов и большим количеством труб в связи с ростом давления пара и производительности котла. Основными типами котлоагрегатов в этот период являлись горизонтально- или вертикально-водотрубные котлы. Третье направление — замена паровой машины паровой турбиной. Количественные характеристики значительно возрастают: паропроизводительность котлоагрегатов достигает 30 т/ч, мощность турбогенераторов — 30 000 кВт. Качественные характеристики: пар давлением до 40 ат, перегретый до 420°С. Развитие тепловой части станций в этот период значительно тормозилось использованием топок слоевого сжигания, ограничивавших возможность повышения паропроизводительности паровых котлов.

Для второго этапа характерно соотношение между числом турбин и котлов 1 : 5 ÷ 1 : 8. Необходимость установки 5—8 котлов на одну турбину сказывалась прежде всего на компоновке тепловой части электростанций с двухрядным размещением котлов. Например, на нью-йоркской электростанции 1898 г. двухрядное размещение распространялось на три этажа и было в известной степени шестирядным. Примером электростанции этого периода может служить станция «Электропередача» (рис. 8.2). Котельная этой станции — двухрядная с котлами 3, обращенными своими фронтами к центральному коридору котельной. Торф с лент 1 загружался в бункеры 2, из которых он поступал в топки 4. За котлами располагались экономайзеры 5 и дымососы 6, отсасывающие топочные газы в два ряда труб 7. Турбогенераторы 8 располагались поперек машинного зала. Первые советские тепловые электростанции, строившиеся по плану ГОЭЛРО (Шатурская, Штеровская и др.), были с двухрядными котельными.

На третьем этапе наблюдается переход к факельному сжиганию угольной пыли в громадных камерных топках, экранированных для защиты обмуровки радиационными поверхностями нагрева, которые увеличивали удельную паропроизводительность. Стремление интенсифицировать процесс горения вызывает введение воздухоподогревателей. Паропроизводительность котлов достигает 400 т/ч,

Первая четверть XX в. характеризуется качественными изменениями в трех направлениях. Первое направление — механизация топок, так как ручная загрузка становится непосильной при возросшей паропроизводительности. Для бурых углей разработаны конструкции ступенчатых топок, для камен-

мощность турбогенераторов — 120 000 кВт. Давление пара возрастает до 125 ат, что вынуждает применять промежуточный перегрев пара во избежание слишком большого его увлажнения на последних дисках конденсационных турбин. Температура пара перед турбиной достигает 525° С. Во время работы в области высокого давления турбины пар охлаждается, затем поступает во вторичный перегреватель, где его температура повышается до 510° С.

Для этого периода характерно применение однобарабанных и безбарабанных котлов. Количество котлов на турбину снижается и доходит до одного, а котельные становятся однорядными, расположенными параллельно машинному залу; число котлов сначала превышает число турбогенераторов, а потом становится равным ему. Так происходит возникновение «блочных» станций, являющиеся повторением на новом уровне самого раннего этапа в развитии паросиловых установок, когда Т. Ньюкомен, И. И. Ползунов и Дж. Уатт строили «блоки», состоявшие из одного котла и одной машины.

Развитие блочных установок характеризует четвертый, современный этап, отличающийся высокой паропроизводительностью котлоагрегатов (до 2500 т/ч и более), способных снабжать паром находящуюся в блоке турбину мощностью 300, 500 или 800 МВт*. Сверхкритические параметры пара, имеющего давление 240 ат, требуют осуществления двойного промежуточного перегрева пара.

Основными типами тепловых электрических станций являются паротурбинные конденсационные (КЭС) и теплофикационные (ТЭЦ) электростанции, а основными направлениями их развития всегда являлись укрупнение мощности электростанций и устанавливаемого на них энергетического оборудования. При этом если в 20—30-е годы текущего столетия единичная мощность энергетического оборудования ограничивалась размером возможного резерва (в энергетических системах ограниченной мощности выход из строя крупного агрегата мог повлечь за собой весьма серьезные последствия для всей системы), то по мере создания крупнейших объединенных энергетических систем эти ограничения были сняты, теперь мощность отдельного агрегата ограничивается не возможностями электроэнергетики, а достигнутым уровнем металлургической и машиностроительной промышленности.

Возрастание единичных мощностей энергетического оборудования повлекло за собой укрупнение вспомогательного оборудования, уменьшение объема главных зданий за счет более рационального размещения оборудования, совмещение конструкций зданий и каркасов котлов, внедрение облегченных металлических строительных конструкций, механизацию топливных хозяйств и т. п. Графики и диаграмма, представленные на рис. 8.3, 8.4, дают представление об

* В нашей стране уже работают экспериментальные образцы энергетических блоков мощностью 500 и 800 МВт на Назаровской и Славянской ГРЭС. Изготавливается блок мощностью 1200 МВт с одновальной турбиной и однокорпусным котлом, который будет установлен на электростанции в Костроме (конечная мощность этой электростанции достигнет 4,8 МВт).

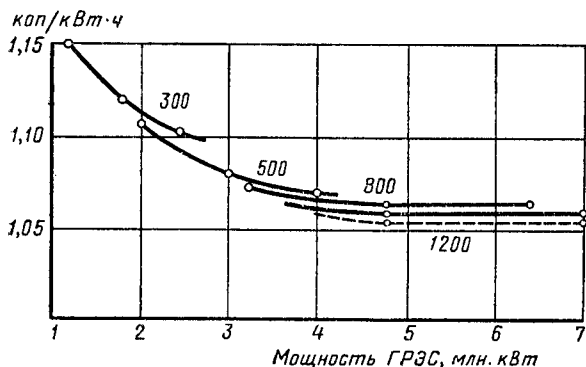


Рис. 8.3. Зависимость удельных расчетных затрат от мощности электростанции для различной единичной мощности энергоблоков (мощность энергоблоков в МВт указана рядом с кривыми)

эффективности внедрения крупных блоков на отечественных электростанциях (по данным института «Теплоэлектропроект»). На рис. 8.5 показан двухвальный турбоагрегат блока мощностью 800 МВт, установленный на Славянской ГРЭС; на этой же электростанции работает блок мощностью 800 МВт в одновальном исполнении.

В последние годы развитие конденсационных электростанций во всех развитых странах идет по блочной схеме (самый совершенный блок — один котел и одновальная турбина). Мощности современных (построенных, строящихся и проектируемых) электростанций составляют уже несколько тысяч мегаватт. К таким гигантам электроэнергетики можно отнести советские электростанции мощностью 2400 МВт: Приднепровскую, Бурштынскую, Змиевскую, Конаковскую. Мощностью самой крупной Криворожской ГРЭС-2 со-

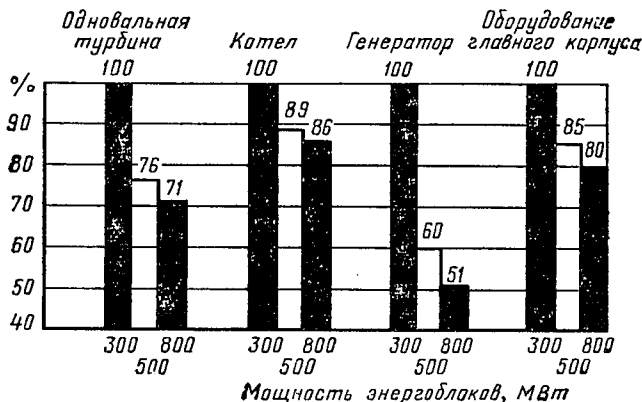


Рис. 8.4. Показатели удельной металлоемкости оборудования блоков разной мощности

ставляет 3000 Мвт. Строятся такие же мощные тепловые электростанции и за рубежом (Парадайз в США, где уже работает блок мощностью 1150 МВт, Дрэкс в Англии, рассчитанная на 4000 МВт, и др.).

Все большее распространение в мировой теплоэнергетике получают теплофикационные электростанции. Особенность теплофика-

ционных станций состоит в том, что пар, отбираемый из нескольких участков проточной части паровых теплофикационных турбин, отдает свое тепло воде, проходящей через ряд водоподогревателей и затем отправляемой в теплофикационную сеть для использования промышленными и городскими потребителями. В области комбинированного производства электрической и тепловой энергии советская теплоэнергетика всегда занимала ведущее место.

Первый опыт комбинированного производства электрической и тепловой энергии в нашей стране был осуществлен в 1924 г. (электростанция № 3 в Ленинграде). Затем теплофикационные установки были созданы на ряде заводов и фабрик Москвы и Ленинграда.

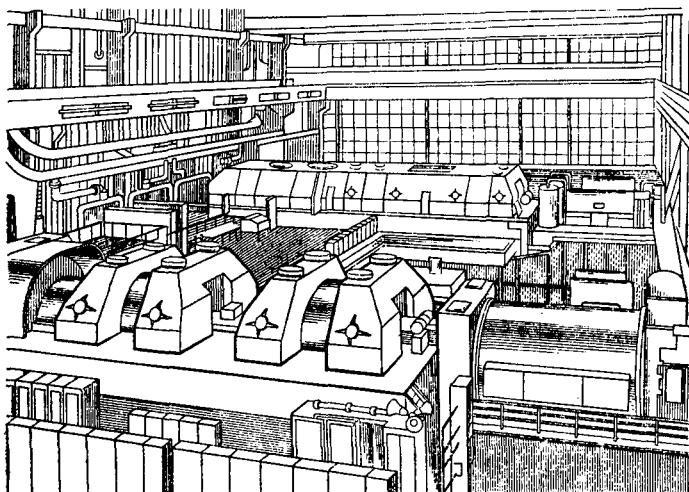


Рис. 8.5. Двухвальный турбоагрегат блока мощностью 800 МВт (производства Ленинградского металлического завода)

Широкая теплофикация крупных городов СССР началась после 1931 г., когда этот вопрос явился предметом обсуждения Пленума ЦК ВКП(б), указавшего на необходимость строительства мощных теплоэлектроцентралей, в первую очередь в крупных промышленных центрах. Эффективность строительства теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) очень велика, так как переход от местных котельных к централизованному теплоснабжению от ТЭЦ дает экономию топлива (за счет более высокого к. п. д. котельных ТЭЦ) до 0,3 Мкал на каждую отпущенную мегакалорию тепла. Расчеты показывают, что в 1975 г. экономия топлива за счет комбинированного производства тепловой и электрической энергии может достигнуть 35 млн. т условного топлива в год.

Для теплофикационных агрегатов также характерен непрерывный рост единичных мощностей. Теплофикационное турбостроение прошло путь от турбин мощностью несколько тысяч киловатт до турбоагрегатов мощностью 100, 135 и даже 250 МВт. Мощности

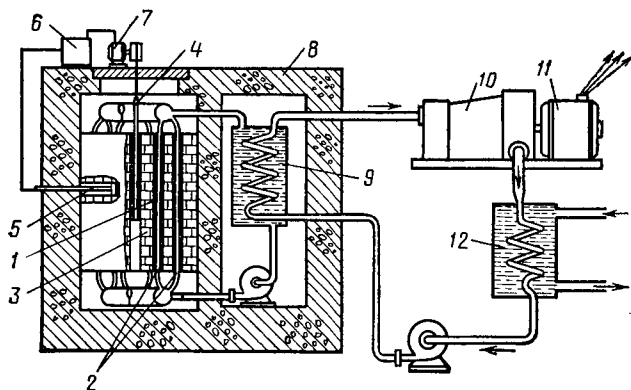


Рис. 8.6. Схема атомной электростанции:

1 — урановые трубы; 2 — трубы циркулирующего теплоносителя первого цикла; 3 — графитовый замедлитель; 4 — регулирующий стержень; 5 — счетчик интенсивности излучения; 6 — реле, принимающее сигналы счетчика; 7 — электродвигатель, который поднимает или опускает регулирующий стержень; 8 — бетонный защитный слой; 9 — котел-теплообменник, в котором теплоноситель первого цикла отдает тепловую энергию рабочему телу второго цикла; 10 — паровая турбина; 11 — электрический генератор; 12 — конденсатор

отдельных теплоэлектроцентралей достигают 1 млн. кВт и более и проектируется превышение этой величины. Однако мощность ТЭЦ не может возрасти выше определенной величины, которая ограничивается потребностями не в электроэнергии, передаваемой в энергетическую систему, а потребностями в тепловой энергии и допустимыми протяженностями тепловых сетей. Например, в городах с населением менее 1 млн. чел. нецелесообразно сооружать ТЭЦ с турбоагрегатами мощностью 250 МВт. В настоящее время удельный вес ТЭЦ непрерывно возрастает во многих северных странах и в странах с умеренным климатом. Например, в СССР, Дании, Швеции доля теплоснабжения (в паре и горячей воде), обеспечиваемая ТЭЦ, составляет примерно 40% от общего потребления тепла низкого потенциала в промышленности и городах. В Директивах XXIV съезда КПСС ставилась задача в девятой пятилетке «... предусмотреть ...рациональную концентрацию и централизацию производства пара и горячей воды для технологических и отопительных нужд, постепенную ликвидацию мелких котельных...». Таким образом, один из важнейших принципов развития отечественной энергетики полностью сохраняет свое значение и на ближайшие годы.

Все более заметную роль в современной электроэнергетике играют атомные электростанции. Первая промышленная атомная электростанция (АЭС) мощностью 5 МВт вступила в строй 27 июня 1954 г. в г. Обнинске (СССР), а уже в девятой пятилетке в нашей стране удельный вес АЭС составил примерно 12% в общем вводе новых мощностей на всех электростанциях. Предполагается, что к

началу 80-х годов в СССР установленная мощность на АЭС возрастает до 30 млн. кВт.

Принцип действия АЭС можно проиллюстрировать схемой, приведенной на рис. 8.6. Здесь приведен пример атомной электростанции с водно-графитовым реактором, когда в качестве замедлителя нейтронов используется графит, а в качестве теплоносителя — обычная вода. По такой схеме работают Обнинская АЭС и Белоярская АЭС, первый блок которой мощностью 100 МВт был введен в действие в апреле 1964 г.

На Нововоронежской АЭС, первый блок которой мощностью 210 МВт был пущен в сентябре 1964 г., были установлены водоводяные энергетические реакторы. В этом случае вода используется как для замедления нейтронов, так и в качестве теплоносителя. Вода и пар второго контура обоих типов установок не радиоактивны, и работа паровой турбины и электротехнического оборудования таких АЭС не отличаются от работы оборудования обычных тепловых электростанций.

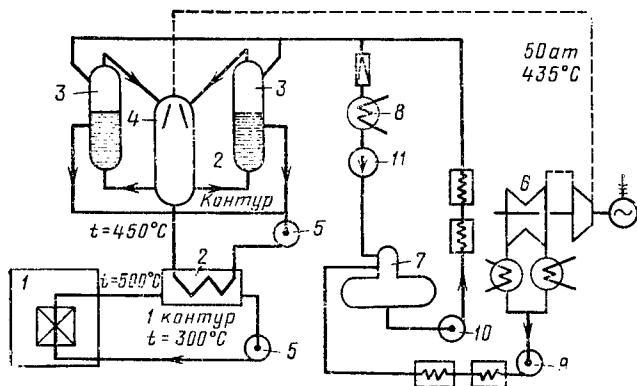
За последнее десятилетие для небольших атомных электростанций были разработаны реакторные установки небольшой единичной мощности, которые могут найти широкое применение в условиях Дальнего Востока и Крайнего Севера. Например, в 1961 г. была построена передвижная АЭС мощностью 1500 кВт, все оборудование которой размещено в четырех самоходных вагонах на гусеничном ходу. Представляет также интерес сооружение атомных ТЭЦ, т. е. таких атомных электростанций, которые будут вырабатывать электрическую и тепловую энергию. Уже работает первая в мире АТЭЦ вблизи поселка Билибино Чукотского национального округа, обеспечивающая теплоснабжение станционных зданий и поселка.

Следующим этапом развития АЭС является использование одноконтурной схемы (например, блок № 2 Белоярской АЭС введен в 1967 г.). В этом случае парогенератор отсутствует, и пар из реактора после сепаратора и перегревателей каналов поступает к турбинам.

Дальнейшее развитие АЭС с ядерными реакторами на тепловых нейтронах связано с увеличением единичной мощности реакторов и турбоагрегатов для них, созданием высокотемпературных реакторов, что, в частности, позволит применять ядерную энергию в высокотемпературных технологических процессах, строительством атомных теплоэлектроцентралей большой мощности и «полупиковых» АЭС.

Весьма перспективным, по мнению специалистов, направлением в развитии атомной энергетики является широкое освоение ядерных реакторов на быстрых нейтронах, которые позволяют значительно эффективнее использовать ресурсы ядерного топлива. Создана серия экспериментальных реакторов-размножителей на быстрых нейтронах с жидким натрием в качестве теплоносителя. Их испытания дали положительный результат. На рис. 8.7 показана принципиальная схема АЭС на быстрых нейтронах. Атомная элект-

Опыт работы атомных электростанций в СССР, а также в таких плотнонаселенных странах, как Англия, Франция, ФРГ, Япония, показал, что при выполнении определенных технических требований соблюдается полная радиационная безопасность для персонала станций и для населения близлежащих районов. А то об-



1 — реактор; 2 — теплообменник натрия; 3 — испаритель; 4 — пароперегреватель; 5 — насос для перекачки натрия; 6 — турбогенератор; 7 — диазотер; 8 — технологический конденсатор; 9, 10, 11 — насосы

По техническим и экономическим соображениям следует ожидать быстрого прогресса в строительстве атомных электростанций.

В канун XXV съезда КПСС завершено строительство первой очереди крупнейшей в мире Ленинградской АЭС имени Владимира Ильича Ленина. Каждый из двух ее энергоблоков имеет мощность

1 млн. кВт — таких мощных реакторов канального типа не имеет ни одна станция в мире.

Начнется ускорение строительства и освоение реакторов на быстрых нейтронах. Начнутся подготовительные работы по использованию атомной энергии для целей теплофикации.

Достижение нового уровня развития какой-либо отрасли техники всегда порождает и новые проблемы. Так, наращивание мощности энергосистем за счет ввода крупных блоков при сверхкритических параметрах пара сделало актуальным решение проблемы регулирования суточных графиков нагрузок. Для покрытия пиков нагрузок велись разработки новых типов электростанций и агрегатов. За последние годы в теплоэнергетике началось использование газотурбинных и парогазовых установок.

В газотурбинных установках (ГТУ) роль генераторов газа повышенного давления играют турбореактивные двигатели, в частности, отработавшие свой ресурс авиационные, а также и судовые двигатели. Они весьма маневренны, пускаются за несколько минут, значительно проще в эксплуатации и дешевле паротурбинных. В разных странах широкое распространение получили газотурбинные установки, значительно повысившие надежность современных крупных энергетических систем. В нашей стране были разработаны опытные ГТУ мощностью 12,5, 25 и 50 МВт, а на Краснодарской ТЭЦ идет монтаж ГТУ мощностью 100 МВт. Отсутствие котельных агрегатов и ряда вспомогательных систем, а также указанные выше достоинства делают ГТУ экономичными и перспективными.

Другим примером нового достижения на пути повышения экономической эффективности теплового цикла и маневренности являются парогазовые установки (ПГУ), соединяющие в себе преимущества газотурбинных (высокие начальные температуры цикла) и паротурбинных (низкие конечные температуры). На парижской электростанции Витри-на-Сене сооружены два турбинных блока по 250 МВт в комбинации с газовыми турбинами. Роль последних сводится к тому, чтобы во время пиков нагрузки генерировать горячий газ, направляемый в топку котла. Это позволяет, с одной стороны, уменьшить отбор пара от паровой турбины, который при неподвижной газовой турбине шел на подогрев воздуха, подаваемого в топку, а с другой стороны, подаваемый в топку газ более высокой температуры, чем подогреваемый воздух, позволяет форсировать котлоагрегат. Таким путем удается при мощностях паровой турбины 250 МВт и газовой турбины 40 МВт достичь в форсированном режиме мощности 320 МВт.

В нашей стране ведется строительство опытно-промышленной ПГУ мощностью 200 МВт на Невинномысской ГРЭС (рис. 8.8).

К числу сравнительно новых способов использования природных энергетических источников можно отнести строительство геотермальных электростанций. В СССР источники горячей подземной воды имеются на Камчатке, Курильских островах, в Дагестане и других местах. В 1966 г. на Камчатке, на Паужетской геотермальной электростанции, был введен в эксплуатацию эксперименталь-

ный турбогенератор мощностью 2500 кВт. Однако в обозримом будущем широких масштабов строительства геотермальных электростанций не предвидится (в частности, из-за большого количества минеральных солей, содержащихся в геотермальных водах, с отложениями которых весьма трудно бороться).

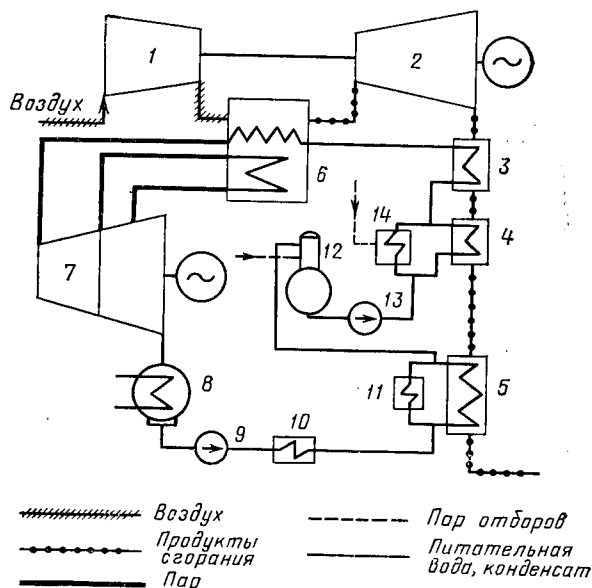


Рис. 8.8. Принципиальная схема парогазовой установки ПГУ-200 для Невинномысской ГРЭС:

1 — компрессор; 2 — газовая турбина; 3, 4 и 5 — экономайзеры; 6 — парогенератор; 7 — паровая турбина; 8 — конденсатор; 9 — конденсационный насос; 10 — подогреватель высокого давления; 11 — подогреватель; 12 — деаэратор; 13 — питательный насос; 14 — подогреватель

Напротив, исключительно большие перспективы открываются в новейшей области энергетики высоких температур: использование плазмы в целях преобразования тепловой энергии в электрическую, минуя обычный тепловой цикл. Ближайшая реализация этого направления состоит в использовании магнитогидродинамических генераторов (МГД-генераторов).

В МГД-генераторе поток «горячих» электропроводящих газов направляется в межполюсное пространство мощных электромагнитов. Движение такого газа равносильно движению якоря с проводниками в магнитном поле, только э. д. с. индуцируется в мысленных проводниках, образованных в слое газа. При помощи электродов, установленных по всей длине канала, электрическая энергия отводится во внешнюю цепь. Таким образом, преобразование тепловой энергии в электрическую происходит без турбин, без каких-либо вращающихся частей. Работа при высоких температурах

(порядка 2500° С) позволяет весь цикл сделать исключительно экономичным. Применение МГД-генераторов в большой энергетике позволит примерно в полтора раза сократить затраты топлива на производство электроэнергии по сравнению с обычными тепловыми электростанциями. Замечательной особенностью МГД-генераторов является то, что они не требуют охлаждения водой и, следовательно, не загрязняют водоемы, а меньший относительный расход топлива и более полное его сгорание уменьшают загрязнение атмосферы. В СССР уже работает МГД-генератор мощностью 200 кВт (У-02); сооружена промышленная электростанция с МГД-генератором мощностью 25 МВт (установка У-25). Опыт эксплуатации их, а также установок, сооружаемых в ФРГ, Японии, США, позволит перейти к изготовлению МГД-генераторов мощностью около 500 МВт и коэффициентом полезного действия 60—65% и выше.

Интересно отметить, что, как это уже не раз бывало в истории энергетической техники, когда новое и еще несовершенное устройство некоторое время сочетается в работе со старым, проверенным и привычным, МГД-генераторы сейчас используются в сочетании с обычной паротурбинной установкой в качестве высокотемпературной надстройки к ней.

На рис. 8.9 приведена одна из возможных схем энергетической установки с МГД-генератором — схема с открытым циклом. Топливо подается в камеру сгорания 1, туда же направляются подогретый в теплообменнике 2 воздух и присадка. В канале плазменного генератора 3, окруженного электромагнитами 4, индуцируется электродвижущая сила. Продукты сгорания отводятся в парогенератор 5, где вода превращается в перегретый пар, который направляется в турбину 6, вращающую генератор 7. Затем пар конденсируется в конденсаторе 8 и насосом 9 направляется вновь в парогенератор. Следовательно, в такой комбинированной установке работают параллельно два источника электрической энергии: МГД-генератор и турбогенератор. Весьма перспективным является сочетание МГД-генераторов с атомными электростанциями.

Дальнейшим развитием применения плазмы является создание термоядерного генератора, в котором будет использован сверхнагретый поток газообразного водорода в сверхсильном магнитном поле, образованном электромагнитами со сверхпроводниками в качестве обмотки.

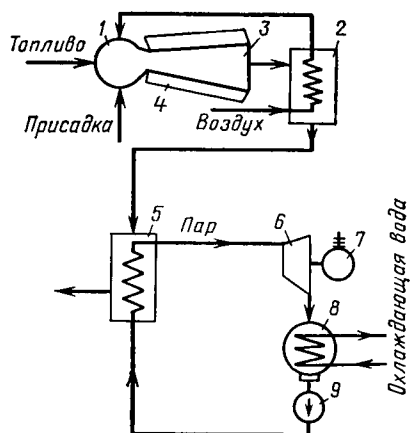


Рис. 8.9. Схема энергетической установки с МГД-генератором и турбогенератором, работающая по открытому циклу

РАЗВИТИЕ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Гидроэлектростанции по сравнению с тепловыми электростанциями обладают рядом достоинств, связанных с экономией топлива, с рациональным решением не только проблем энергетики, но и ряда других, имеющих важное народнохозяйственное значение: судоходство, ирригация и мелиорация земель, водоснабжение и т. д.

Опыт эксплуатации первых гидроэлектростанций показал, что они имеют большую маневренность, хорошую надежность работы и малые эксплуатационные расходы, требуют немногочисленного обслуживающего персонала и допускают полную автоматизацию процесса производства электроэнергии с весьма широкими возможностями телеуправления. Современные гидравлические турбины обладают к. п. д., достигающим до 93%. Энергия, производимая гидроэлектростанциями, дешевле электроэнергии тепловых электростанций.

В техническом и эксплуатационном отношении очень важным является то, что гидроэлектрические установки обладают маневренностью. Эта особенность гидроагрегатов имеет особо важное значение для крупных энергетических систем, так как резкий прирост нагрузки, особенно при аварийных условиях в системе, можно быстро компенсировать включением резервных гидроагрегатов. Таким образом, гидроагрегаты очень удобны для покрытия пиков нагрузки в системах, сочетающих как тепловые, так и гидравлические станции. Кроме того, конструкция агрегатов ГЭС проще, чем тепловых станций, а процесс производства электрической энергии менее сложен.

Недостатком гидравлических станций является их «локальность», отмеченная еще Марксом, т. е. возможность эффективной эксплуатации гидростанций только в относительно немногих пунктах. Эта локальность преодолевается передачей энергии на расстояние электрическим током, однако в некоторых случаях передача энергии перевозкой топлива экономически более оправдана, особенно при применении нефтепроводов и газопроводов. Следует отметить, что первоначальные затраты на сооружение ГЭС выше, чем на тепловые электростанции.

Современные гидротехнические сооружения представляют собой сложные комплексы. Так, например, плотина служит для создания подпора и пропуска через нее воды, льда и речных наносов; водозаборные устройства предназначены для подачи воды, орошения, водоснабжения и т. п. Шлюзы, плотоходы, бревноспуски, газани и т. п. являются сооружениями водотранспортного назначения и обеспечивают сохранение и улучшение условий речного транспорта после возведения плотины. Рыбоходы, рыбоподъемы и т. п. устраиваются для сохранения и развития рыбного хозяйства реки, на которой сооружена плотина. Наконец, дамбы и запани являются регуляционными частями гидроузла, сооружаемыми для направления водного потока на оба бьефа. Энергетические устройства гидроузла — собственно гидростанция, ее машинный зал, распре-

лительные устройства, насосные агрегаты и т. п. — служат для производства и распределения электрической энергии.

Бурный прогресс в машиностроении, строительной технике и передаче электрической энергии на расстояние сделал возможным сооружение крупных энергетических установок при мощных гидроузлах. Развитие гидроэнергостроительства в текущем столетии показывает не только рост размеров мощности установок, но и непрерывное их совершенствование в механической, электрической и строительной частях. За это время были разработаны методы сооружения гидроэлектростанций в различных географических условиях — для использования энергии высоконапорных горных рек и для низконапорных рек равнинных частей суши.

Развитие гидроэлектростроительства протекало вначале довольно медленно. Прошло несколько лет после Лауфен-Франкфуртской передачи, пока были сооружены Рейнфельдская гидроэлектростанция (Германия, 1898 г.) мощностью 16,8 тыс. кВт при напоре 3,2 м, Ниагарская (США) мощностью 37 тыс. кВт при напоре 41,2 м, Жонажская (Франция, 1901 г.) мощностью 8,2 тыс. кВт. Несколько позже, в начале второго десятилетия нашего века, были пущены в ход гидроэлектростанции Аугуст-Виллен (Германия, 1911 г.) мощностью 32 тыс. кВт, Кеокук (США, 1912 г.) мощностью 132 тыс. кВт и др. Эти очень крупные для своего времени электростанции стали школой для сооружения и освоения гидротехнических устройств. Качество турбинного оборудования этих ГЭС было еще недостаточно высоким, и их к. п. д. колебался в пределах 80—84%. Несовершенными были также и формы, и конструкции гидросооружений, что объясняется недостаточной в то время изученностью вопросов инженерной гидравлики и гидротехники. Поэтому некоторые из ГЭС, построенных в эти годы, в последующем подверглись более или менее серьезной реконструкции (в том числе и Ниагарская ГЭС).

В дореволюционной России действовало очень мало гидроэлектростанций. Кроме ранее упомянутой установки на Охтинском заводе в Петербурге мощностью 295 кВт (1896 г.), в России действовали ГЭС, считавшиеся в свое время крупными: «Белый уголь» на р. Подкумок (сооружена в 1903 г.) мощностью 730 кВт; Гиндукушская ГЭС (пущена в 1909 г.) на р. Мургаб мощностью 1170 кВт. Кроме этих ГЭС, действовало несколько более мелких по мощности (Сашнинская, Аллавердинская, Тургусунская, Сестрорецкая и др.). Общая мощность всех гидростанций дореволюционной России составляла всего около 8000 кВт.

После Великой Октябрьской социалистической революции гидроэлектростроительству в нашей стране придавалось всегда исключительное значение. В знаменитом ленинском плане ГОЭЛРО сохранился целый раздел, в котором характеризовались гидроэнергетические ресурсы страны и были определены принципы гидроэнергетического строительства. Сооружение каждой крупной ГЭС в нашей стране всегда отмечалось как всенародный праздник, как новый вклад в дело строительства социализма и коммунизма.

В декабре 1926 г. на торжественном открытии Волховской ГЭС — первенца советского гидростроительства — С. М. Киров сказал: «Отныне седые воды Волхова будут работать на социализм». А в 1932 г. мир был поражен успехом советских гидроэнергетиков, пустивших в эксплуатацию самую мощную тогда в мире Днепровскую ГЭС им. В. И. Ленина. С тех пор советское гидроэлектростроительство заняло ведущее место в мире.

Эффективная часть гидроэнергетических ресурсов на территории СССР составляет примерно 1100 млрд. кВт·ч среднегодовой

выработки электроэнергии, а об использовании этого экономического потенциала можно судить по тому, что в 1970 г. на ГЭС было выработано 124 млрд. кВт·ч электроэнергии, что составляет только 11,3%. Поэтому в нашей стране имеются практически неисчерпаемые возможности для развития ГЭС. Советские энергетики решили многие сложнейшие задачи, связанные с созданием ГЭС, в частности, проблемы сооружения электростанций на равнинных реках с мягкими грунтами. Яркие примеры уникальных гидротехнических сооружений — Свирская ГЭС (автор проекта Г. О. Графтио) и Днепровская ГЭС имени В. И. Ленина (автор проекта И. Г. Александров).

В особо широких масштабах гидроэлектростроительство в нашей стране развернулось после Великой Отечественной войны. Началось сооружение крупных ГЭС на Волге, Ангаре, Оби, Иртыше, Енисее. Новые ГЭС создавались не только на равнинных реках, но и высоконапорные в горных районах, осваивались новые виды оборудования, новая строительная техника, новые методы организации и технологии производства работ. Сложными и интересными с точки зрения прогресса гидростроительства явились такие станции, как Ингури-ГЭС в Закавказье с бетонной арочной плотиной высотой 271 м, Нурекская ГЭС на р. Вахш в Таджикистане с каменно-набросной плотиной высотой 300 м и подземным зданием станции, Чиркейская и Токтогульская ГЭС с арочными плотинами высотой более 200 м, строящиеся в зонах высокой сейсмичности, Вилюйская ГЭС, построенная в районе вечной мерзлоты.

В настоящее время сооружаются деривационные и приплотинные ГЭС. На деривационных гидроэлектростанциях существенная (а иногда и большая) часть напора создается деривационными водоводами, являющимися искусственными сооружениями в виде открытых каналов, лотков, туннелей или трубопроводов. Водяные турбины ставятся на деривационном водоводе. Такие ГЭС подходят для горных рек. В СССР к этому типу ГЭС относятся Земо-Авчальская, Канакирская, Храмская, Фархадская, Гюмушская.

Приплотинные ГЭС устроены так, что напор в них создается специально сооруженной плотиной, которая, подпирая уровень воды, создает верхний бьеф. Здание ГЭС обычно располагается вблизи плотины: вода из водохранилища поступает к турбинам по напорным водоводам, проходящим через тело плотины либо под плотиной, либо непосредственно из верхнего бьефа. После использования вода из турбины отводится в русло. Для пропуска избытков воды устраиваются особые водосливные плотины. К такому типу ГЭС относятся Волховская, Днепровская, ГЭС на Волге (Иваньковская, Угличская, Волжские имени В. И. Ленина и им. XXII съезда КПСС), Братская им. 50-летия Великого Октября, Красноярская ГЭС им. 50-летия СССР и др.

В турбинных блоках некоторых ГЭС размещены отверстия для холостых сбросов паводковых вод и подведения воды к турбинам. Эти ГЭС называют совмещенными. В гидроэлектростанциях встроенного типа агрегаты размещают в теле бетонной плотины,

так что необходимость сооружения особого машинного здания отпадает.

В развитии гидроэлектростроительства наблюдается общая для электроэнергетики тенденция укрупнения агрегатов и увеличения мощности электростанций. Если в 30-е годы текущего столетия единичная мощность крупнейших агрегатов составляла несколько десятков мегаватт, то мощность агрегатов крупнейших Волжских ГЭС равна 115 МВт, Братской ГЭС им. 50-летия Великого Октября — 225 МВт, а мощность агрегатов Красноярской ГЭС достигла 500 МВт. Крупнейшими в мире гидроэлектростанциями являются Братская ГЭС мощностью 4,1 млн. кВт и Красноярская ГЭС мощностью 6 млн. кВт. Мощность сооружаемой Саяно-Шушенской ГЭС составит 6,4 млн. кВт, а единичная мощность агрегатов этого сверхгиганта — 650 МВт.

Характерной особенностью современного гидроэнергостроительства является сооружение на крупных реках каскадов гидроэлектростанций (Ангаро-Енисейский, Волжско-Камский, Днепровский, Разданский, Нарын-Сырдарьинский и др.). К концу девятой пятилетки в СССР будут действовать одиннадцать полностью завершенных каскадов ГЭС (рис. 8.10).

Новейшими направлениями в области гидроэлектростроительства являются приливные и гидроаккумулирующие электростанции. Уже работает приливная электростанция (ПЭС) Ранс на Ла-Манше мощностью 240 тыс. кВт. С 1967 г. ведется опытная эксплуатация второй в мире приливной электростанции — Кислогубской в Баренцевом море (СССР). Плотины ПЭС отгораживают часть моря так, что во время прилива образуется перепад в несколько метров. В нужный момент открываются затворы, и вода направляется на лопасти гидротурбины, выравнивая уровни моря и замкнутого бассейна. При отливе образуется верхний бьеф со стороны бассейна и нижний — со стороны моря, и вода направляется в обратную сторону, по-прежнему вращая рабочее колесо турбины. Приливные электростанции предназначены для покрытия пиков нагрузок. Их мощность может составлять от сотен тысяч до миллионов киловатт. Так, проектирующаяся ПЭС в Мезенской губе Белого моря при разности уровней воды в 10 м будет в состоянии развивать мощность до 4,5 млн. кВт, т. е. практически такую же, как Братская ГЭС.

Гидроаккумулирующие станции также предназначаются для покрытия пиков нагрузки, когда они работают как обычные гидроэлектростанции. Но они также и потребляют электрическую энергию, вырабатываемую другими электростанциями системы. В те часы, когда электроэнергия дешева, когда имеется ее избыток, например, в поздние ночные часы, гидроаккумулирующая станция превращает свои обратимые турбины в насосы, перекачивающие воду из нижнего в верхний бассейн. Так происходит аккумулирование энергии в форме потенциальной энергии воды, поднятой на определенную высоту. Первая в СССР гидроаккумулирующая станция (ГАЭС) мощностью 225 тыс. кВт построена под Киевом. Разработана схема сооружения гидроаккумулирующих электростан-

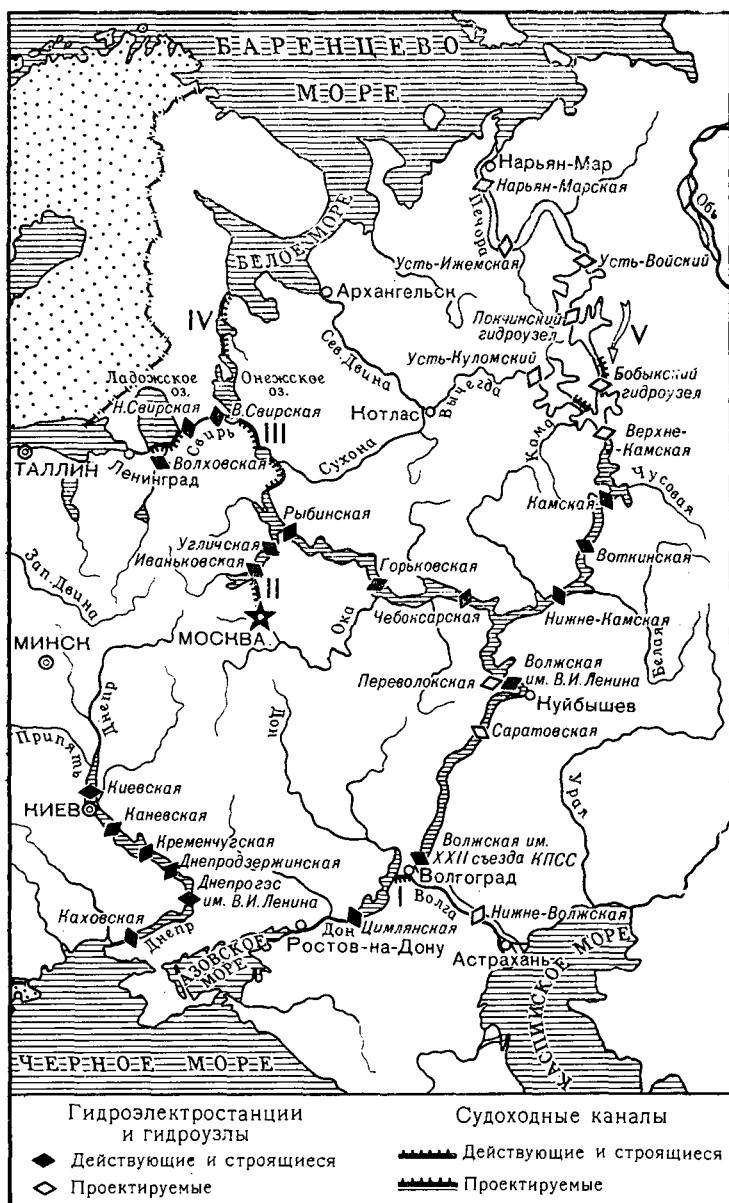


Рис. 8.10. Схема каскадов ГЭС на реках европейской части СССР

ций в Загорске под Москвой (мощностью 1200 тыс. кВт), на притоках Оки в Алексине, Коломне, Серпухове. Несколько ГАЭС будет сооружено на Волге, а также на Немане, Свири и других реках. Однако по технико-экономическим соображениям в ближайшее время преимущество в строительстве «пиковых» станций будет отдаваться станциям с газотурбинными установками. Разрабатываются комплексы, в которые входят тепловая, гидравлическая и гидроаккумулирующая станции, связанные единым технологическим процессом производства электроэнергии с многократным использованием одной и той же массы воды (на тепловой станции — для охлаждения).

Сооружение ГАЭС и трудности в разработке электромобилей напоминают лишний раз о том, что не только в период пионерских работ в области электротехники, но и вплоть до нашего времени не решена очень важная электротехническая проблема — проблема аккумуляирования больших количеств электроэнергии экономичным путем. Эта задача, над которой в настоящее время работают большие коллективы ученых и инженеров во всех развитых странах мира, должна найти свое решение.

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Рассмотрим важнейшие этапы развития основных схем станций и распределительных устройств (рис. 8.11).

Основные схемы электрических соединений электростанций. На первых электростанциях постоянного или переменного тока осуществлялись простейшие схемы электрических соединений. На станциях переменного тока вначале все генераторы работали изолированно друг от друга, т. е. каждый генератор питал через отдельную линию с простейшими приборами свою группу потребителей. Такое необеспеченное резервом электроснабжение объяснялось главным образом тем, что еще не были выяснены в достаточной мере условия параллельной работы машин переменного тока.

Иным было положение на станциях постоянного тока: уже на первых электростанциях осуществлялась параллельная работа машин. Генераторы присоединялись к сборным шинам, от которых отходили основные питающие линии. В цепь генератора обычно включали плавкие предохранители, разъединители и амперметры. На отходящих линиях устанавливались плавкие предохранители. Минимальный автоматический выключатель ставился на одном из полюсов машины на случай, если ток, даваемый машиной в сеть, почему-либо упадет ниже определенной величины.

При резких колебаниях нагрузки, особенно на трамвайных электростанциях, использовались генераторы со смешанным возбуждением (компаундные машины). В этих случаях, помимо основных двух сборных шин, монтировалась еще третья, уравнивающая, необходимая для осуществления устойчивой параллельной работы машин.

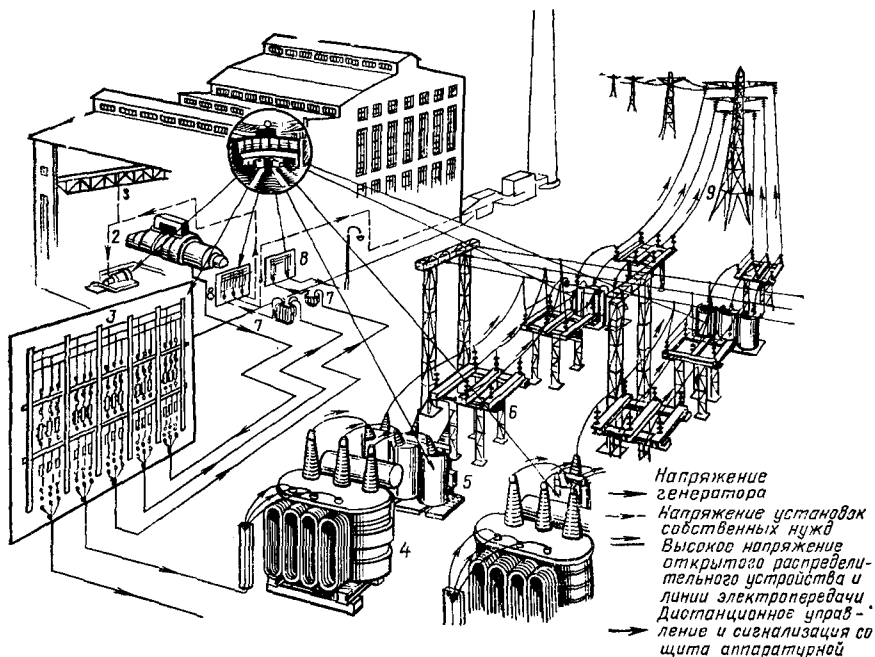


Рис. 8.11. Схема основного электрического оборудования электростанции:

1 — щит управления; 2 — турбогенератор; 3 — распределительные устройства генераторного напряжения; 4 — повышающие трансформаторы; 5 — групповые масляные выключатели; 6 — групповые разъединители; 7 — трансформаторы собственных нужд; 8 — распределительные устройства собственных нужд; 9 — линия электропередачи

Наконец, третьей разновидностью схем электрических соединений электростанций постоянного тока являлась схема станции с аккумуляторной батареей. В этом случае к основным сборным шинам добавлялась зарядная шина, а к основной аппаратуре — переключатель для переключения генератора на сборную или зарядную шину и двойной элементный коммутатор, позволяющий при зарядке батареи от одного генератора питать нагрузку от другого генератора и батареи.

На электростанциях, построенных в более позднее время, главным образом на трехфазных, получили применение разнообразные схемы основных соединений.

В распределительных устройствах на станциях и подстанциях вначале применялась простейшая схема с одной системой сборных шин. Однако из-за очевидных ее недостатков (отключение всей станции при ремонтах сборных шин и шинных разъединителей и коротких замыканиях) она быстро была вытеснена другими схемами и сохранила свое значение лишь в электроустановках малой мощности (обычно с одним источником питания).

Представляет интерес вопрос о применении выключателей в схемах электрических станций. Вначале, когда выключатели еще

не предназначались для отключения токов коротких замыканий, при возникновении трудности с отключением токов высоких напряжений стремились обходиться вообще без выключателей. Так поступали М. Депре, Р. Тюри и другие инженеры. Затем на электростанциях переменного тока выключатели стали устанавливать только со стороны генераторного напряжения, а линия присоединялась к трансформаторам «в блок», т. е. без выключателей. По такой схеме работала электропередача Лауфен — Франкфурт, а в более позднее время — линия Богородская станция — Москва. Однако необходимость осуществлять промежуточные отборы электроэнергии заставила вдоль трассы линии сооружать подстанции и применять отключающие аппараты высокого напряжения в распределительных устройствах как станций, так и подстанций.

Примерно до начала второго десятилетия текущего столетия (в России — до 1912 г.) чаще всего использовалась схема с одной системой сборных шин, секционированной выключателями (1) и разъединителями (2) (рис. 8.12, а).

Преимущественное распространение получила схема с двумя системами сборных шин при одном выключателе на цепь (рис. 8.12, б). В России впервые такая схема была введена в 1912 г. на московской электростанции «Общества 1886 г.» (ныне 1-я МГЭС). Позднее пытались неоднократно вернуться к одной секционированной системе сборных шин на генераторном и повышенном напряжениях вплоть до 110 кВ. Но все же преобладающей являлась схема с двумя системами шин, которая была очень удобна для испытаний поврежденного оборудования, легко приспособлялась к различным требованиям эксплуатации и не представляла затруднений для последующего развития станции и системы.

С 1947 г. на ГРЭС и ТЭЦ в распределительных устройствах напряжением 110 кВ и выше стали повсеместно выполнять схему с двумя основными и третьей обходной системами шин при отдельном обходном выключателе. С дальнейшим ростом единичной мощности агрегатов (500, 800 МВт, а в перспективе и больше) и эта схема оказалась неудовлетворительной, так как в случае аварии

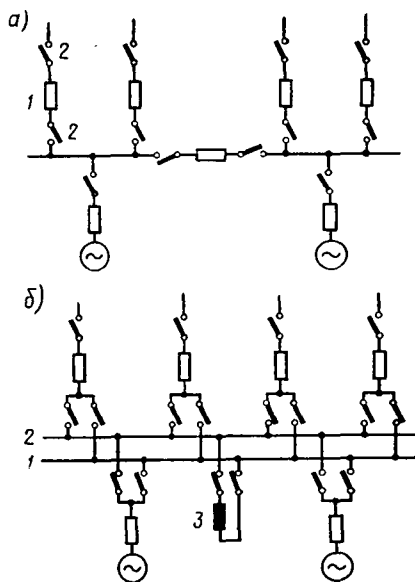


Рис. 8.12. Схема с одной системой сборных шин (а):

1 — выключатели; 2 — разъединители; схема с двумя системами сборных шин (б):

1 — рабочая система шин; 2 — резервная система шин; 3 — шинносоединительный выключатель

в каком-либо из элементов распределительного устройства возникает возможность вывода из строя огромной мощности, равной половине мощности всей электростанции (а при повреждении шиносоединительного выключателя могут выйти из строя все цепи распределительного устройства). Поэтому с 1964 г. для электростанций с агрегатами 500 МВт и выше стали рекомендовать проекты схем распределительных устройств, в которых не происходит отключения более чем одного агрегата и двух линий при повреждении в любой части распределительного устройства.

Еще в 20-х годах для ограничения токов короткого замыкания применялись реакторы-катушки с большим индуктивным и малым активным сопротивлением.

Относительно применения трансформаторов можно заметить, что всегда, когда была возможность, стремились устанавливать на ГРЭС и ТЭЦ трехфазные трансформаторы (вплоть до мощности 630 МВ·А и напряжения 500 кВ). При большей мощности приходится устанавливать группы из однофазных трансформаторов (рис. 8.13).

Развитие конструкций распределительных устройств. Важным элементом каждой электростанции и подстанции является электрическая установка, предназначенная для приема и распределения электроэнергии и называемая распределительным устройством.

Первые электростанции имели весьма скромное оборудование, и на некоторых из них отсутствовали даже измерительные приборы. Критерием правильности работы таких станций служил накал ламп. Напряжение машин регулировали по накалу.

В процессе совершенствования электростанций было предложено много конструктивных решений. На некоторых станциях выключатели, реостаты, измерительные приборы и основная проводка были смонтированы непосредственно на деревянной стене. Однако на некоторых станциях уже в 80-х годах стали создавать простейшие распределительные устройства в виде распределительных щитов. Чаще всего это была обычная деревянная доска, на которой монтировались приборы. Отсюда появился распространенный в мировой электротехнической литературе термин «распределительная доска». Распределительное устройство одновременно являлось и щитом управления.

Вскоре деревянные доски были заменены мраморными или шиферными панелями, а в 20-х годах текущего столетия стали применять стальные щиты управления.

Распределительные щиты на электростанциях обычно размещались непосредственно в машинном зале, например, даже на такой крупной для своего времени электростанции, как Богородская станция «Электропередача» (1914 г.). Теперь распределительное устройство и пост управления находятся в отдельном здании на довольно значительном расстоянии от агрегатов, чтобы сделать работу ответственного дежурного более спокойной.

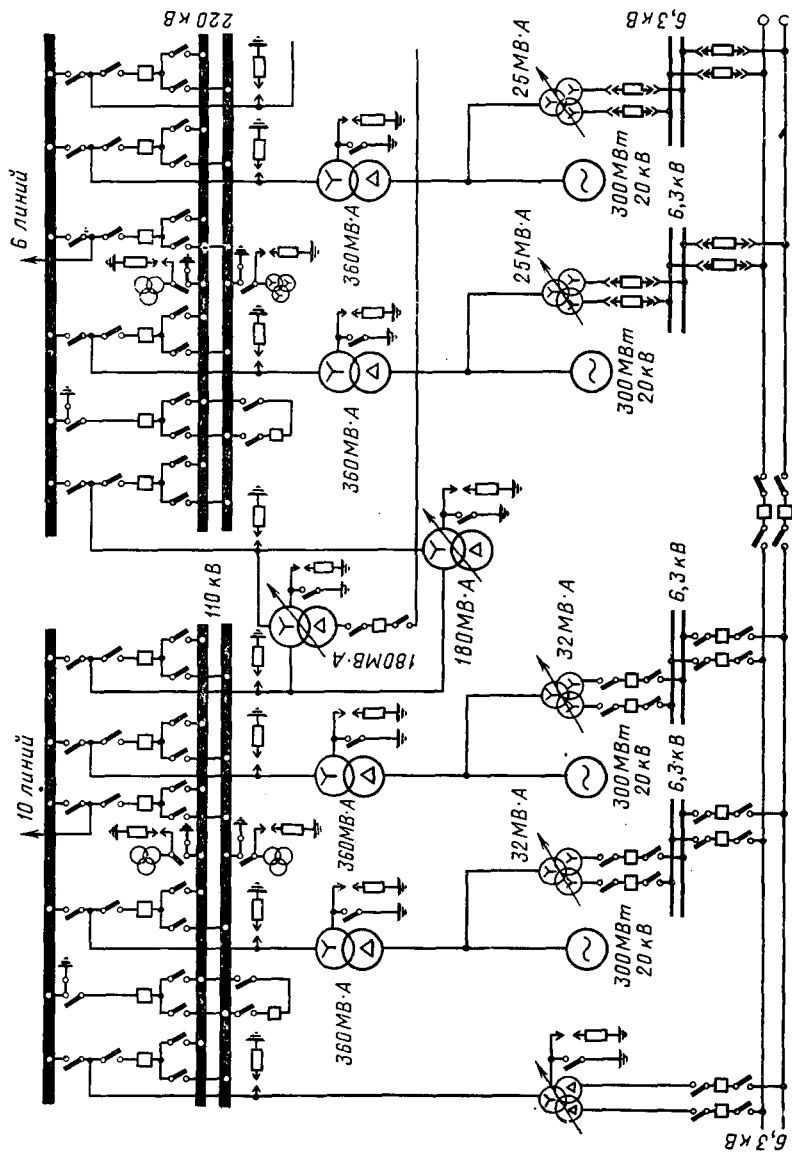


Рис. 8.13. Принципиальная схема электрических соединений типовой ГРЭС с четырьмя блоками по 300 МВт

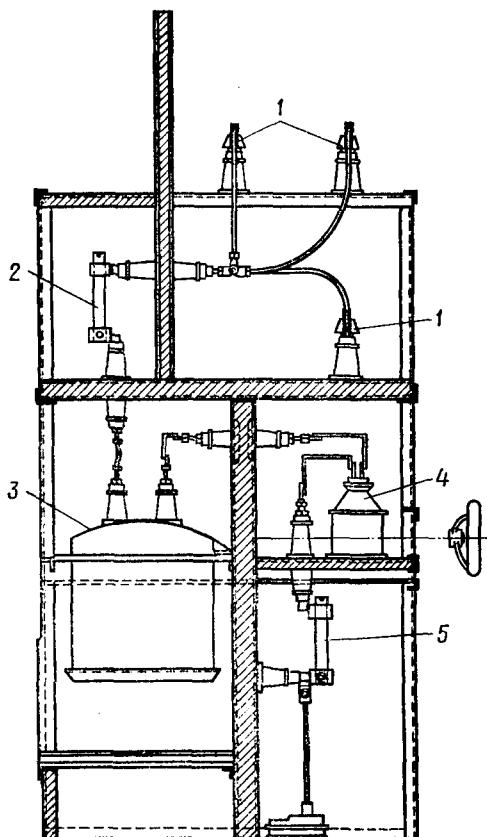


Рис. 8.14. Распределительное устройство 2 кВ для схемы с одной системой сборных шин (1908 г.):

1 — сборные шины; 2 — шинный разъединитель; 3 — масляный выключатель; 4 — трансформатор тока; 5 — линейный разъединитель

Распределительные устройства генераторного напряжения с первых десятилетий XX в. стали приобретать конструктивные формы, удобные и по возможности безопасные в эксплуатации. На рис. 8.14 показана конструкция распределительного устройства 2 кВ для схемы с одной системой сборных шин (Московская электростанция «Общества 1886 г.», ныне 1-я МГЭС).

Конструкции распределительных устройств приспосабливались к типам и особенностям выключателей. Пока отключаемые мощности были невелики и применялись выключатели с разрывом дуги в воздухе, распределительные устройства имели легкие конструкции, часто без перегородок между ячейками. Взрывоопасность масляных выключателей заставила утяжелить конструкцию зданий; для выключателей во втором десятилетии текущего столетия стали строить взрывные камеры из кирпича и бетона. Применение сборных конструкций до начала 20-х годов большого

распространения не получило. На рис. 8.15 показан пример конструкции распределительного устройства 6 кВ со взрывными камерами для схемы с двойной системой шин (1930 г.). Устройства со взрывными камерами в 30-х годах стали типичными в нашей стране для напряжений 6, 10 и 35 кВ. Даже после того как промышленность стала выпускать малообъемные горшковые выключатели, которые практически не взрываются, еще некоторое время продолжали строить распределительные устройства со взрывными камерами, так как трудно было заранее предвидеть, какие выключатели будут установлены на той или иной станции.

В послевоенные годы в распределительных устройствах стали широко применяться малообъемные выключатели, позволившие су-

ущественно упростить строительную часть здания путем использования сборных конструкций.

Весьма прогрессивным явлением в развитии электростроительства стало применение комплектных распределительных устройств. В настоящее время комплектные распределительные устройства применяются для напряжений 6—10 и даже 35 кВ для установки на открытом воздухе.

Первоначально распределительные устройства повышенного напряжения (35 кВ и выше) сооружались также закрытого типа. Ячейки устройства в одних случаях отделялись одна от другой перегородками, а в других такие перегородки отсутствовали. Такие распределительные устройства были небезопасны для обслуживающего персонала.

С ростом напряжений чрезмерно возрастали объем и стоимость строительной части распределительных устройств. Поэтому сначала в Америке, а в 20-х годах и в Европе стали строить открытые распределительные устройства.

В СССР вначале все распределительные устройства, даже на 110 кВ, выполнялись закрытыми, и только в 30-х годах открытые распределительные устройства 110 кВ стали обычным явлением в практике отечественного электростроительства. В настоящее время открытые распределительные устройства выполняются на напряжения от 6 кВ (главным образом от 35) и для более высоких напряжений. Разрабатываются типовые компоновки открытых распределительных устройств на напряжения 330—750 кВ, предусматривающие возможность монтажа и ремонта основного оборудования при помощи специальных самоходных механизмов.

РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

Характерным в развитии электропередач всегда являлось увеличение передаваемых мощностей, протяженности линий и как следствие — увеличение напряжений. Повышение этих параметров

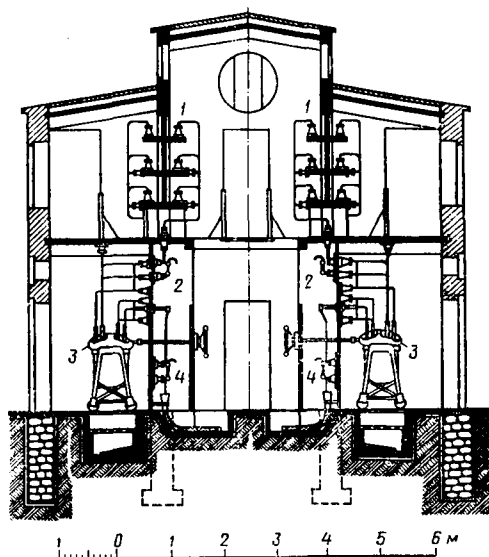


Рис. 8.15. Распределительное устройство 6 кВ со взрывными камерами для схемы с двойной системой сборных шин:

1 — сборные шины; 2 — шинные разъединители; 3 — масляные выключатели; 4 — линейные разъединители

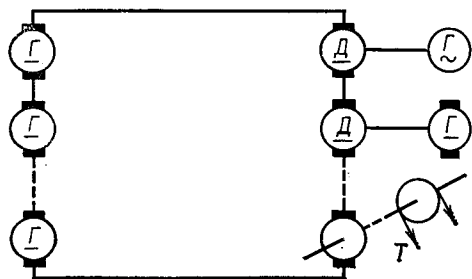


Рис. 8.16. Система Тюри:

Γ — генератор постоянного тока; Δ — двигатель постоянного тока; $\sim$ — генератор переменного тока; T — трансмиссия

на каждом новом этапе ставило новые и более сложные задачи перед учеными и инженерами, перед конструкторами электрических машин, трансформаторов, линейных устройств и коммутационной аппаратуры.

Практически возможны являются два метода электропередачи: постоянным или переменным токами. Оба эти метода с различными успехами разрабатывались на протяжении всей истории электроэнергетики.

Основными средствами передачи электрической энергии являются воздушные и кабельные линии со всем необходимым оборудованием.

Передача энергии постоянным током

В развитии электропередачи постоянным током можно выделить два основных направления: первое, характеризующееся попытками получить высокое напряжение без преобразования рода тока, и второе, связанное с использованием преобразовательной техники.

Наибольших достижений в развитии техники передачи электроэнергии постоянным током удалось добиться швейцарскому инженеру Рэне Тюри. Он весьма удачно реализовал предложение Фонтена, введя небольшое усовершенствование: выходящая из строя машина специальным автоматом отсоединялась от линии, а оба конца линии, подведенные к этой машине, замыкались накоротко. На приемном конце линии сооружалась подстанция, на которой последовательно включались двигатели. Каждый из этих двигателей приводил в действие генератор низкого напряжения или трансмиссию. Таким образом, «система Тюри» представляла собой линию высокого напряжения, присоединенную своими концами к двум системам последовательно соединенных машин (рис. 8.16).

Первая электропередача по системе Тюри была осуществлена в Генуе; ее сооружение началось в 1889 г. и закончилось в 1893 г. Эта установка работала сначала при напряжении 5—6, затем 10 и даже 14 кВ при начальной мощности 325 кВт. Общая длина линий электропередачи достигала 60 км. Затем по системе Тюри было сооружено еще около 15 линий передач (одна из них — в Батуми). Наиболее значительной и долговечной была линия передачи Мутье — Лион во Франции, введенная в эксплуатацию в 1906 г. Эта линия протяженностью 180 км первоначально работала при напряжении 57 кВ и была рассчитана на мощность 4630 кВт.

На участке линии, проходившем в районе высокой грозовой активности, были проложены подземные кабели. В 1927 г. электропередача была реконструирована. Последовательно с первой гидростанцией были включены еще две. При этом длина линии возросла на 80 км, передаваемая мощность — до 20 МВт, а напряжение было увеличено до 125 кВ. Только в 1937 г. линия Мутье — Лион была заменена трехфазной. Остальные линии передачи по системе Тюри были вытеснены трехфазными раньше. Ценный опыт эксплуатации воздушного и кабельного участков линии Мутье — Лион при напряжении свыше 100 кВ представляет практический интерес и в наши дни. Опытами передачи по системе Тюри завершилось первое направление в развитии электропередачи постоянным током.

Второе направление возникло в 1918 г. К этому времени, как будет показано ниже, уже успешно действовали мощные трехфазные электропередачи высокого напряжения (до 150 кВ). Но уже к концу второго десятилетия текущего столетия наметились контуры новой и, нужно сказать, весьма неожиданной проблемы. Дело в том, что при значительных расстояниях передачи при высоком напряжении начинала существенно сказываться емкостная проводимость линии и значительно возрастал емкостный ток *. При передачах энергии на расстояния более 300—500 км этот емкостный ток уже трудно было бы компенсировать. Первым оценил важность наметившейся проблемы М. О. Доливо-Добровольский, и в ноябре 1918 г., за год до своей смерти, он выступил с докладом на тему «О границах применения переменных токов для передачи энергии на большие расстояния». Эта работа явилась логическим завершением того огромного вклада в развитие электротехники, который был сделан М. О. Доливо-Добровольским.

На основе технико-экономического расчета Доливо-Добровольский показал, что возможности применения переменного тока для целей электропередачи ограничены и будущее в этом вопросе принадлежит постоянному току. В качестве примерной границы применения переменного тока для целей электропередачи он указал напряжение порядка 200 кВ и расстояние порядка нескольких сотен километров. Эти параметры с современной точки зрения являются, конечно, заниженными, но это ни в коей мере не умаляет важности принципиальной постановки задачи.

В 1918 г. Доливо-Добровольский не мог еще оценить недостатков передачи энергии переменным током, связанных с электрической устойчивостью передачи, иначе его рассуждения получили бы еще более аргументированный характер. Замечательным является то, что еще в 1918 г. Доливо-Добровольский указывал, что одной

* В данном случае речь идет об изолированной работе электрической станции на длинную линию, в конце которой присоединена нагрузка. Емкостный характер тока особенно резко выражен при холостом ходе линии. По мере увеличения нагрузки возрастает компенсирующее действие индуктивности проводов линии.

из вероятных схем передачи энергии может быть линия постоянно-го тока, присоединенная на своих концах к преобразовательным подстанциям. Таким образом, он указал на вероятность того, что генерирование и распределение электроэнергии в будущем будут производиться переменным током, а ее передача — выпрямленным током высокого напряжения. В качестве одного из вариантов решения проблемы преобразования переменного тока в постоянный Доливо-Добровольский назвал применение ртутных выпрямителей.

Рост мощностей электростанций и дальности электропередач, укрупнение энергосистем были столь быстрыми, что уже в 1920—1922 гг. в США, а затем и в других странах серьезно изучался вопрос об устойчивости параллельной работы генераторов. Известно, что нарушение устойчивости при каких-либо более или менее резких изменениях режима вызывается расстройством синхронной работы генераторов на связанных линиями электростанциях (в этих случаях линии представляют собой большую индуктивность, разделяющую синхронные генераторы). Крупнейшая авария в ноябре 1965 г. в Нью-Йорке показала, что нарушение устойчивости линий электропередачи переменного тока может привести к «распаду» даже очень крупную энергетическую систему. Глубокое изучение этого вопроса привело к тому, что наряду с другими более или менее успешными методами повышения устойчивости параллельной работы стала рассматриваться и такая радикальная мера, как осуществление межсистемных связей линиями постоянного тока. В этом случае две связанные такой линией системы могут работать и не синхронно друг с другом.

В качестве основной принципиальной схемы стала рассматриваться схема Доливо-Добровольского — линия постоянного тока с преобразовательными подстанциями на концах (рис. 8.17).

При всех своих преимуществах электропередача постоянным током обладает крупными недостатками. Во-первых, она требует применения сложных и дорогих выпрямителей и инверторов и, во-вторых, затрудняет решение задачи об отборе энергии в промежуточных пунктах линии, так как современная техника практически еще не располагает выключателями постоянного тока высокого напряжения.

Особенно активно проблема применения постоянного тока обсуждается в последнее время, когда создание крупнейших энергетических систем, таких, например, как объединенная энергетическая система европейской части СССР, потребовало сооружения невиданных по мощности и напряжениям магистралей для транспорта электроэнергии. Впрочем, исследования в области повышения устойчивости параллельной работы, выполненные в 40-е и 50-е годы текущего столетия, позволили значительно повысить недавно казавшиеся предельными параметры электропередачи. Опыт эксплуатации линий Волжские ГЭС — Москва показал, что в настоящее время нет оснований говорить о достижении предела передачи электроэнергии переменным током. Тем не менее указанные

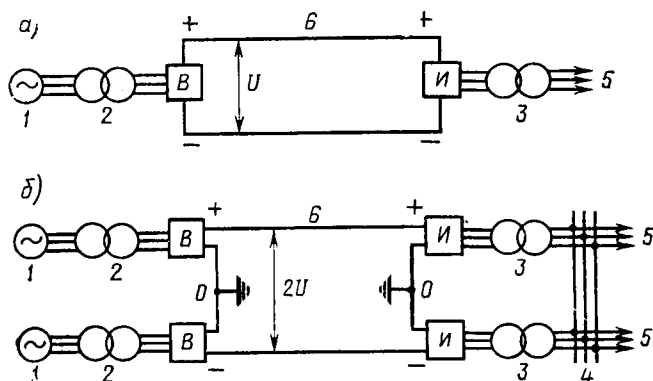


Рис. 8.17. Схемы передачи электроэнергии постоянным током:

a — передача без использования земли; *б* — передача с использованием земли в качестве нейтрального провода; *В* — выпрямитель; *И* — инвертор; *1* — синхронные генераторы; *2* — повышающие трансформаторы; *3* — понижающие трансформаторы; *4* — сборные шины переменного тока; *5* — распределительная сеть; *б* — линия электропередачи

выше технические, а также экономические достоинства длинных линий постоянного тока заставляют продолжать работы по опытной проверке теоретических результатов.

В конце 30-х — начале 40-х годов в разных странах было построено несколько опытных линий передачи постоянного тока напряжением 30—90 кВ. Одна из первых линий на ртутных вентильях (15 кВ) для связи между собой энергосистем разной частоты (25 и 60 Гц) была построена в США в Питтсбурге, однако затем почти 30 лет (вплоть до упоминавшейся аварии в Нью-Йорке) проблемой передачи постоянным током в США занимались крайне мало. Перед Второй мировой войны работы по электропередачам постоянным током начались и в Германии, но уже построенная первая очередь самой крупной передачи Эльба — Берлин (200 кВ, 30 МВт) из-за войны не была пущена. Широкую известность получила кабельная линия постоянного тока Швеция — остров Готланд (100 км, 20 МВт, 100 кВ), опытная эксплуатация которой началась в 1954 г., а промышленная — в 1956 г. В качестве обратного провода используется морская вода (схема «полюс — земля», рис. 8.17, *a*).

В СССР исследования по передаче энергии постоянным током начались в 30-е годы. В 1938 г. началось проектирование линии постоянного тока Куйбышевская ГЭС — Москва (тогда считали, что устойчивая передача энергии переменным током может осуществляться лишь на расстояние не более 400 км). После войны, прервавшей работу, линию Куйбышев — Москва было решено строить на переменном токе. Первая опытно-промышленная линия постоянного тока Кашира — Москва была пущена в 1950 г. Линия была выполнена двумя одножильными кабелями (112 км, 20 кВ, 30 МВт)

с ртутными вентилями на подстанциях. В 1969 г. ртутные вентили заменены тиристорными блоками.

В 1962 г. началась эксплуатация воздушной линии Волгоград — Донбасс, сооруженной по схеме «два полюса — земля» с напряжением между полюсами 800 кВ. Протяженность этой линии 473 км, передаваемая мощность к 1965 г. достигала 720 МВт. На линии Волгоград — Донбасс широко используют возможность изменять направление потока энергии независимо от частоты и уровней напряжений в соединенных системах переменного тока.

Сейчас представляется наиболее перспективным применение кабельных линий постоянного тока даже небольшой сравнительно мощности в тех случаях, когда линия должна пересекать большие водные пространства (как в случае шведской линии) или проходить через малонаселенные районы, где не требуется осуществлять промежуточных подключений. С другой стороны, рассматриваются проекты глубоких кабельных вводов постоянного тока для таких крупных городов, как Лондон, Нью-Йорк, а также проекты межсистемных связей в Западной Европе (в том числе через Ла-Манш), в Новой Зеландии, Японии (между островами) и т. д. Для связи между собой энергосистем разной частоты (Япония, США, Канада) создаются специальные преобразовательные подстанции с звеном постоянного тока «нулевой длины».

В нашей стране ближайшей перспективой является сооружение линий передач постоянного тока с напряжением 1500 кВ (± 750 кВ) и выше для связи между собой объединенных энергетических систем европейской части СССР, Сибири и Казахстана. Предполагается, что первая линия такой передачи (1500 кВ, 6000 МВт, 2414 км) пройдет от Экибастуза до Тамбова, соединив центр с северным Казахстаном. По этой линии будет передаваться в центр около 40 млрд. кВт·ч электроэнергии в год, получаемой путем использования дешевых углей Экибастузского угольного бассейна.

Передача энергии переменным током

Многолетняя борьба за выбор рода тока закончилась в свое время полной победой сторонников переменного тока, причем решающую роль в этой победе сыграла трехфазная система. В настоящее время передача электрической энергии на большие расстояния осуществляется, за редким исключением, только переменным током.

Уже отмечалось, что вся история электропередачи сопровождалась увеличением передаваемых мощностей, напряжений и протяженностей линий. На первом этапе преобладающей по важности проблемой было уменьшение потерь в линии передачи, что, следовательно, требовало повышения напряжения электропередач.

К началу 90-х годов прошлого столетия максимальные напряжения достигали 6—10 кВ. В Лауфен-Франкфуртской передаче уровень напряжений был повышен до 30 кВ, а дальность передачи — до 170 км. Передаваемые мощности составляли несколько

сотен и реже — тысяч киловатт. В 1901 г. в Америке на р. Миссури была построена линия электропередачи на 50 кВ, затем к 1903 г. предельное напряжение возросло до 60 кВ, мощности передач — до 17 тыс. кВт (Ниагара — Буффало), а дальность в одном случае достигла 350 км (Кольгейт — Сан-Франциско). На рис. 8.18 показаны графики роста напряжений воздушных линий электропередач.

В течение первого десятилетия текущего столетия на первый план выдвинулась проблема изоляции линий.

Применявшиеся штыревые изоляторы не позволяли поднять напряжение выше 60—70 кВ. Это ограничивало пропускную способность линий: для увеличения мощности передачи приходилось сооружать несколько параллельных цепей, что было весьма дорого. Только изобретение в конце 1906 г. подвесных изоляторов (Хьюлетт, США) позволило увеличить применявшиеся напряжения. В 1908—1912 гг. в Америке и Германии были построены первые линии 110 кВ, а следующее десятилетие дало увеличение напряжений еще в 2 раза (1920 г. — 165 кВ и 1922 г. — 220 кВ).

Новое затруднение на пути роста напряжений возникло в связи с увеличением потерь на корону. Многочисленные теоретические исследования, проводившиеся в 1910—1914 гг. (В. Ф. Миткевич в России, Пик в Америке, Г. Капп в Англии и др.), показали, что уменьшить потери на корону (повысить критическое коронное напряжение) можно путем увеличения действительного или «электрического» диаметра провода. Первое направление привело к применению алюминиевых, сталеалюминиевых и полых проводов большого диаметра. Второе направление (предложение В. Ф. Миткевича, 1910 г.) расширило указанные возможности применением расщепленных проводов, когда каждая фаза линии состоит, например, из трех проводов. При этом увеличивается «электрический» диаметр провода и к тому же снижается индуктивность проводов. Последнее обстоятельство оказалось очень важным в дальнейшем развитии техники электропередачи. Первая линия 220 кВ с расщеплением фазы на два провода была построена в 1956 г. на Урале, а затем с расщеплением каждой фазы на три провода стали строиться все линии 400 и 500 кВ.

Следующим этапом борьбы за освоение высоких напряжений явилась разработка методов компенсации индуктивного падения напряжения в линии. При напряжениях свыше 110 кВ и дальности

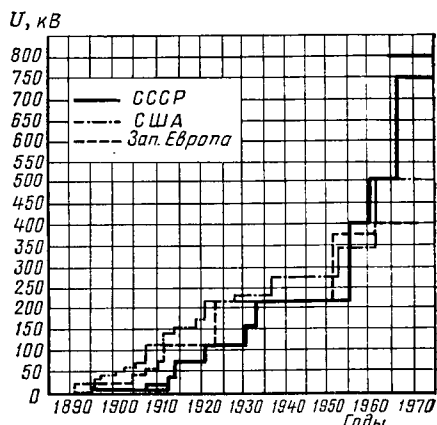


Рис. 8.18. Рост напряжений воздушных линий электропередачи

передач свыше 150—200 км индуктивное падение напряжения принимает такие размеры, что становится невозможным поддерживать постоянным напряжение в конце линии. Этот вопрос нашел свое решение путем применения статических конденсаторов и синхронных компенсаторов. Впервые синхронный компенсатор был использован по предложению М. О. Доливо-Добровольского еще в 1892 г. на линии Бюлах — Эрликон (Швейцария).

Наконец, одной из наиболее серьезных проблем в развитии электропередач явилась возникшая в 20-х годах проблема устойчивости параллельной работы электростанций. Известно, что при нарушении статической (при малых нарушениях нормального режима) или динамической (при резких и глубоких нарушениях режима работы) устойчивости генераторы на станциях выпадают из синхронного режима и происходит так называемый распад энергетической системы. Если при протяженности линий 200—300 км нет опасений за нарушение статической устойчивости и удастся обеспечить динамическую устойчивость при быстром (0,1 с и меньше) отключении аварийного участка, то при дальности передачи 500—1000 км наиболее сложной задачей является обеспечение статической устойчивости. Основополагающие работы по анализу этой проблемы выполнили в 30-х годах А. А. Горев, П. С. Жданов, С. А. Лебедев и другие в СССР, Парк, Робертсон и другие в США. В результате широких научных исследований удалось найти ряд методов повышения устойчивости (регулирование турбин, аварийная разгрузка системы по частоте, форсировка возбуждения, внедрение быстродействующих защит, компенсация параметров линии и др.). В настоящее время обеспечена устойчивая работа таких крупнейших в мире линий электропередач, как линии Волжские ГЭС — Москва протяженностью примерно 1000 км с пропускной способностью до 100 МВт на одну цепь.

Опыт эксплуатации линии Волжская ГЭС имени В. И. Ленина — Москва, работавшей на напряжении 400 кВ, показал, что эту электропередачу без существенных изменений можно перевести на напряжение 500 кВ. Все последующие линии такого класса стали строить на напряжение 500 кВ, которое вошло в качестве стандартного в одну из двух существующих в СССР шкал напряжений (35—110—220—500 кВ). В другой шкале (35—150—330 кВ) появилось новое напряжение — 750 кВ. Первая передача 750 кВ (90 км, 1200 МВт) построена под Москвой (Конаково — Белый Раст); на этой линии изучается и накапливается опыт строительства и эксплуатации сооружений нового класса напряжений. Наконец, планом девятой пятилетки предусмотрено создание комплекса нового оборудования для линий переменного тока напряжением 1150 кВ.

Развитие кабельных и воздушных линий

На заре развития электроэнергетики многие конструкции и схемы заимствовались из области неэнергетических применений электричества. Особенно много дала в этом отношении телеграфная

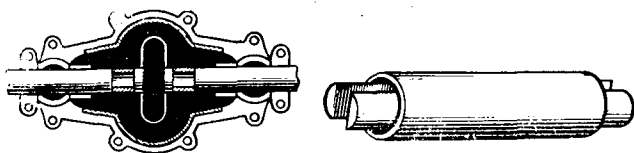


Рис. 8.19. Кабельная муфта и кабель Эдисона (1882 г.)

техника. В связи с развитием телеграфа родилась и получила начальное развитие кабельная техника.

В первые годы строительства силовых электрических сетей наиболее естественной казалась подземная проводка, которая лучше защищена от механических повреждений и не портит внешнего вида улиц. Поэтому уже в 1880 г. делаются первые попытки проложить силовые кабели на напряжение 220 В. Эти кабели ничем в принципе еще не отличались от обычных кабелей связи. В качестве изоляции использовалась гуттаперча. Для сети первой центральной электрической станции (1882 г.) Т. Эдисон создал специальную конструкцию кабеля и кабельной муфты (рис. 8.19).

В 1884 г. в Вене был проложен одножильный силовой кабель с рабочим напряжением 2 кВ, изолированный пропитанным джутом, который уже широко применялся в телеграфных кабелях. Кабели с джутовой изоляцией получили довольно широкое распространение в 80-х и начале 90-х годов прошлого столетия.

Решающую роль в развитии кабельной техники сыграло применение пропитанной бумажной изоляции. Вначале (конец 80-х и 90-е гг.) бумажную изоляцию комбинировали с пропитанным джутом, который накладывался поверх бумаги. Однако в первые годы текущего столетия были достаточно выяснены прекрасные изоляционные свойства кабельной бумаги, и она стала основным типом изоляции кабелей.

Недостатки кабелей с поясной изоляцией привели к созданию кабеля с экранированными жилами (1913 г., Хохштедтер, Германия), в котором силовые линии электрического поля имеют только радиальное направление. Такие трехжильные кабели, рассчитанные на напряжения до 60 кВ, начали изготавливаться в 1918—1919 гг.

Другим вариантом трехжильного кабеля высокого напряжения являлся изобретенный в 1924 г. кабель с отдельно свинцованными жилами (С. М. Брагин и С. А. Яковлев, СССР). В этом кабеле линии электрического поля направлены тоже радиально, но, кроме того, этот кабель более гибок и надежен в эксплуатации. Такой кабель на напряжение 33 кВ был проложен в 1924 г. в Ленинграде (ленинградское кабельное кольцо).

Борьба за повышение напряжений на кабельных линиях привела к созданию маслонаполненных кабелей, изобретенных в 1919 г. и выпускавшихся с 1923 г. В СССР маслонаполненный кабель 110 кВ был проложен в 1931 г. вблизи Ленинграда. В 1926—1928 гг. стали появляться газонаполненные кабели, а затем в 30-х

годах — маслостатические кабели (три экранированные жилы находятся в стальной трубе, которая заполняется маслом под давлением до 15 ат).

Для некоторых типов кабелей высокого напряжения (переносные, рентгеновские и др.) применяется резиновая изоляция. Сначала жилы кабелей изготавливали исключительно из меди и только в конце 20-х — начале 30-х годов началось применение кабелей с алюминиевыми жилами. Тогда же чугунные соединительные муфты стали заменять свинцовыми.

Прогрессивным направлением в развитии кабельной техники явилось постепенное расширение перехода от свинцовых оболочек к более дешевым алюминиевым. В настоящее время уже более 80% силовых кабелей выпускается с алюминиевыми оболочками. Алюминиевые оболочки применяются также и для кабелей связи. Резко расширен выпуск проводов и кабелей с пластмассовой изоляцией.

В настоящее время кабельные линии прокладываются главным образом в городах и поселках городского типа и на территории промышленных предприятий, т. е. там, где это необходимо по технико-экономическим соображениям (высокая концентрация мощных нагрузок), а также по соображениям безопасности и эстетики. Маслонаполненные кабели среднего давления (на напряжения 110—220 кВ) используются для глубоких вводов энергии в центры городов и крупных промышленных предприятий, а кабели высокого давления (на напряжения 110—500 кВ) широко применяются для устройств переходов через водные пространства, а также на мощных гидроэлектростанциях для передачи энергии от повышающих трансформаторов к открытым распределительным устройствам, размещенным на берегах реки.

Одной из важнейших задач, которые решаются в настоящее время, является разработка конструкций и освоение производства кабелей на напряжения 750 кВ переменного тока и 1500 кВ постоянного тока.

Для электропередач большой протяженности преимущественное применение получили воздушные линии. Исторически сложилась основная схема передачи и распределения электроэнергии: от районной электростанции идут одна или несколько цепей линии электропередачи, затем от приемной подстанции — питающие провода или фидеры, идея которых была выдвинута еще около 1880 г. Т. Эдисоном; наконец, от трансформаторных пунктов снабжается энергией разветвленная местная сеть. Со временем появились различные модификации основной схемы электроснабжения: замыкание линий в кольцо, перенесение подстанций внутрь цехов промышленных предприятий, и т. п.

Особенно удачным оказалось сооружение колец линий высокого напряжения вокруг крупных промышленных городов. Эти кольца играют роль сборных шин, на которые по радиальным линиям вливается энергия от районных электростанций. Такое кольцо воздушных линий, в частности, создано вокруг Москвы. По его примеру строились кольца для некоторых зарубежных городов.

Широкое применение получил ввод линий высокого напряжения в центры промышленных городов — «глубокий ввод», что значительно снизило потери в электрической сети крупного города. Одним из первых в мировой практике был глубокий ввод линии Шатура — Москва (1925 г.), которая вошла в самый центр города, к Кремлю.

Известно, что основными элементами воздушных линий являются провода, изоляторы и опоры. Эта так называемая механическая часть линий передачи вначале целиком была заимствована у телеграфных линий. Опоры выполнялись в виде деревянных столбов, провода были сначала стальными, а изоляторы — штыревыми (стеклянными, а затем фарфоровыми).

Постепенно в 80—90-х годах прошлого столетия стальные провода стали вытесняться медными. Начавшееся в конце прошлого века промышленное производство электролитической меди позволило снизить в несколько раз ее стоимость, хотя и до сегодняшнего дня медь остается дефицитным и сравнительно дорогостоящим материалом. В течение первых десятилетий текущего столетия медь заняла место основного проводникового материала в электротехнике.

Новый этап в развитии механической части линии был связан с переходом к алюминиевым и сталеалюминиевым проводам (в последнем случае центральная стальная жила придает проводу необходимую механическую прочность).

С ростом напряжений изменялись конструкции изоляторов. Уже на рубеже 80—90-х годов XIX в. применение простых штыревых колоколообразных изоляторов оказалось недостаточным. Для усиления изоляции на штыревых изоляторах стали делать кольцеобразный желоб, заполнявшийся маслом. Так возникли фарфорово-масляные изоляторы. В 1898 г. в Германии получили распространение изоляторы с длинными и тонкими фарфоровыми юбками, названные штыревым изолятором типа «дельта». Этот изолятор применялся для напряжений до 70 кВ. Позднее, на основе теоретических исследований, был разработан изолятор типа «фарадoid», поверхность которого очерчивалась по силовым линиям электрического поля.

Как отмечалось, повысить напряжение электропередач выше 60—70 кВ удалось после изобретения в 1906 г. подвесных изоляторов, получивших повсеместное распространение для напряжений выше 35 кВ (рис. 8.20). Много внимания уделялось способам подвески проводов. Для уменьшения нагрузки на промежуточные опоры при обрыве провода были разработаны выпускающие зажимы (в довоенное время). Для линий 330—500 кВ были использованы зажимы с ограниченной прочностью заделки, которые позволяют проводу при обрыве проскальзывать, но не выпускают его на землю.

Большое многообразие конструкций характерно для развития опор линий передач. До начала текущего столетия строились исключительно деревянные опоры с горизонтальными траверсами.

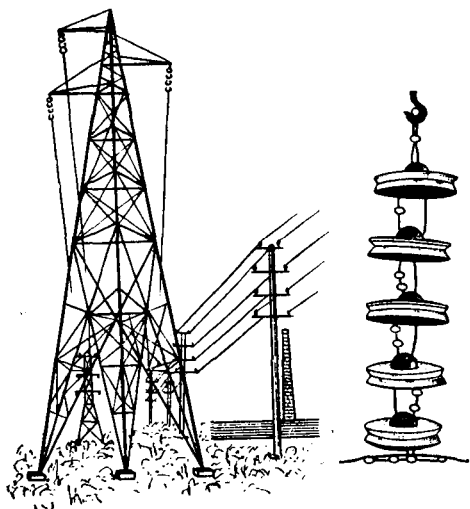


Рис. 8.20. Линия 110 кВ с подвесными изоляторами (1908 г.)

В Советском Союзе с первых лет электрификации очень широко применяются деревянные опоры. Здесь были выполнены всесторонние исследования механической прочности (Н. И. Сушкин и А. А. Глазунов) и разработаны весьма удачные конструкции деревянных опор. Основным типом опоры линий 110 и 35 кВ стала деревянная П-образная опора. В СССР, так же как и в США, имели место попытки применять деревянные опоры даже для линий 220 кВ (Рыбинск — Углич, Магнитогорск — Златоуст). Все же для линий 220 кВ и выше обычным стало применение металлических опор.

Прогрессивным направлением в развитии конструкций опор является их изготовление из железобетона. В СССР первые железобетонные опоры были разработаны еще в 1933 г., но только позднее, в 50-х годах, когда получила большое развитие индустрия железобетонных изделий, этот тип опор стал весьма распространенным.

В настоящее время линии 500 кВ становятся основой для осуществления межсистемных связей, а объединение энергосистемы Юга в СССР будет произведено на напряжении 750 кВ. На этих линиях используется самое современное оборудование: трехстоечные анкерно-угловые опоры, стальные промежуточные опоры portalного типа на оттяжках, четыре сталеалюминиевых провода в каждой фазе и два сталеалюминиевых грозозащитных троса, которые будут одновременно использованы для связи.

Перспективы передачи электроэнергии с использованием глубокого охлаждения

Рост напряжений линий электропередач, вызываемый требованиями увеличения дальности и пропускной способности, вероятно, не может быть безграничным. При переходе к каждому новому классу напряжений возникают все более и более трудные проблемы разработки комплексов высоковольтного оборудования. Ведущие в СССР в течение 5 лет работы по освоению напряжения 1150 кВ и десятилетняя совместная программа США и Швеции по созданию оборудования на 2250 кВ по всей видимости представля-

ют разумный предел, превышение которого приведет к такому удорожанию оборудования, которое не сможет покрыть полученные выгоды. Существует также проблема передачи больших токов при относительно малых рабочих напряжениях.

Как это неоднократно бывало в истории техники, в развитии электропередач снова обратились к давно оставленным идеям. Действительно, поскольку работы по повышению рабочих напряжений встретили затруднения, то целесообразно с новым арсеналом технических средств вернуться к вопросу об уменьшении электрического сопротивления линии. Существенно снизить сопротивление обычных проводниковых материалов, а также проводниковых материалов высокой степени чистоты можно путем их глубокого охлаждения. Такие проводники получили название гиперпроводников. Кроме того, голландский физик Камерлинг-Оннес открыл в 1911 г., что при температурах, близких к абсолютному нулю, некоторые металлы становятся сверхпроводниками. Известно, что столь низкие температуры можно получать путем использования жидких газов. Самую низкую температуру дает жидкий гелий (4,2 К). Перспективно использование более дешевого жидкого водорода, температура кипения которого 20 К.

Идея сверхпроводящих линий, равно как и устройств электрических машин, трансформаторов, электромагнитов и т. п., со сверхпроводящими обмотками была воспринята с большим энтузиазмом. Однако более четырех десятилетий новое физическое явление не удавалось реализовать в практических конструкциях. Только в середине 50-х годов, когда были открыты биметаллические сплавы типа сплава ниобия с оловом, удалось существенно приблизить практическое решение проблемы. Примерно через 10 лет в строй вступили первые опытные установки со сверхпроводящими (криогенными) линиями и электромагниты со сверхпроводящими обмотками (в обмотке такого электромагнита почти нет потерь, и для запуска установки достаточно начальной мощной инжекции энергии, которая длительное время затем практически не рассеивается). В этих условиях предусматривается довольно сложное холодильное оборудование, а жидкий газ должен заполнять пространство вблизи токоведущей жилы.

Исследования показали, что сверхпроводники успешно можно применять для передачи постоянного тока (при переменном токе резко возрастают потери, которые сводят к нулю достоинства сверхпроводника). Только к 1967 г. было установлено, что использование тонкой пленки сверхчистого ниобия, специальным образом нанесенной на медную основу, позволяет при глубоком охлаждении передавать переменный ток с небольшими потерями. Техно-экономические расчеты показывают, что достигнутый к началу 70-х годов уровень научно-технических исследований возможности передачи энергии по гиперпроводникам и сверхпроводникам позволяет надеяться на близкое сооружение промышленных линий. На рис. 8.21 показан один из возможных вариантов криогенной линии.

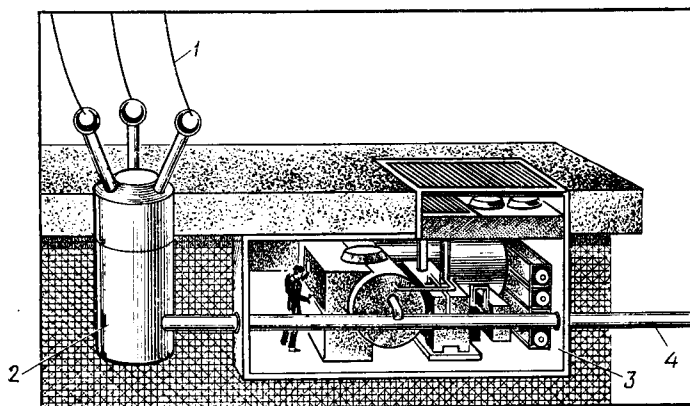


Рис. 8.21. Возможный вариант размещения холодильного оборудования и конструкции кабеля криогенной линии электропередачи:

1 — воздушная линия (от электростанции); 2 — конечный сосуд Дюара; 3 — рефрижераторная станция; 4 — кабель с жилами в виде медных труб, покрытых тонкой пленкой чистого ниобия; внутри термоизоляционной оболочки кабеля находится жидкий гелий

Другим методом, близким к практическому осуществлению, является передача электроэнергии по глубокоохлаждаемым (криогенным) волноводам. В этом случае энергия постоянного тока в начале линии должна быть преобразована в колебания сверхвысокой частоты. Затем переданная, как в радиотехнике, по волноводу энергия должна быть в конце линии вновь преобразована в постоянный ток или переменный ток промышленной частоты.

ОБЪЕДИНЕННЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

После первой мировой войны во всех развитых в техническом отношении странах шел интенсивный рост электроэнергетических систем. Энергетические системы создавались в крупных промышленных и густонаселенных районах. Естественно, географическое положение этих районов накладывало свой отпечаток на формирование энергетических систем. Постепенно выявилось три основных типа сетей энергосистем (рис. 8.22). Первый тип представляет собой системы с центральным узлом, который питается по радиальным линиям от районных электростанций (рис. 8.22, а). Примером такой схемы может служить энергосистема Московской области. Второй тип систем характеризуется большой протяженностью линий передачи, связывающих цепь электростанций (рис. 8.22, б). По такому пути развивалась, например, Уральская энергосистема. И, наконец, третий тип энергосистем (например, энергосистема Донбасса) представляет собой разветвленную сетку линий с электростанциями в узлах (рис. 8.22, в).

При параллельной работе нескольких электростанций возникли новые задачи. Нужно было обеспечить экономичное распределение нагрузки между станциями, регулировать напряжение в сети, не допускать нарушений устойчивой работы. Без решения этих задач параллельная работа станций затруднялась. Каждая станция стремилась работать в наиболее выгодном для себя режиме: не принимать слишком большой нагрузки в часы максимума и не снижать своей мощности в часы минимума нагрузки. Очевидный выход заключался в централизации: подчинении работы всех станций системы одному ответственному инженеру. Так возникла идея диспетчерского управления.

В СССР впервые функции диспетчера стал выполнять с 1923 г. дежурный инженер 1-й Московской станции, а в 1925 г. в системе Мосэнерго был организован диспетчерский пункт. Вслед за Мосэнерго диспетчерские пункты стали возникать в других системах СССР. При диспетчерских пунктах организовывались специальные службы систем: служба релейной защиты, служба изоляции и грозозащиты и др.

Следующим этапом в развитии энергетических систем явилось создание мощных линий электропередачи, объединяющих отдельные системы в более крупные объединенные энергосистемы (ОЭС). Такое решение позволяет наилучшим образом использовать установленные мощности электростанций, оборудовать их предельно крупными агрегатами (200—800 МВт на один агрегат) при относительно малом резерве и широко использовать сезонные колебания мощности гидростанций. При значительных протяженностях такие системы обеспечивают за счет временных (например, по поясам времени) смещений более равномерную загруженность сетей. Так, в 30-х годах в СССР проходило объединение энергосистем Московской, Горьковской, Ивановской, Ярославской и других областей. Благодаря этим мероприятиям объединенная система Центра по суммарной мощности и выработке электроэнергии вышла на первое место в Европе.

Высшей формой создания энергетических систем на современном этапе является образование единых энергетических систем (ЕЭС) крупных географических областей. Существуют единые энергетические системы в странах Западной Европы. В США рабо-

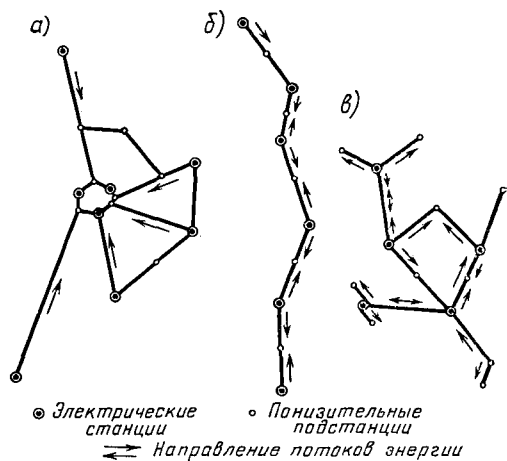


Рис. 8.22. Основные типы сетей энергетических систем

тает энергосистема, объединяющая несколько десятков миллионов киловатт установленной мощности.

В СССР в 60-х годах к ОЭС Центра, Урала, Средней Волги и Юга были постепенно присоединены ОЭС Северного Кавказа, Северо-Запада, Закавказья. В 1970 г. была завершена гигантская работа по созданию Единой энергетической системы европейской части страны (ЕЕЭС), в состав которой вошли 61 энергосистема и три энергетических района с общей установленной мощностью свыше 100 млн. кВт. Территория, охватываемая этой сверхмощной системой, составляет около 6 млн. км² с населением свыше 180 млн. человек.

Другим мощным энергообъединением является ОЭС Сибири, сети которой простираются от Омска до Улан-Удэ и в состав которой входят восемь энергосистем. Действует также крупная ОЭС Средней Азии (семь энергосистем), формируется ОЭС Дальнего Востока. Директивами XXIV съезда КПСС предусмотрены крупные работы, направленные на создание Единой энергетической системы СССР (ЕЭС) путем соединения ЕЕЭС и ОЭС Северного Казахстана и Сибири.

В последнее время начинают создаваться межгосударственные энергетические объединения. Линии электропередачи перешагивают государственные границы; в этом находит свое отражение новейший этап развития производительных сил общества, когда на повестку дня встали задачи экономической интеграции огромных районов и, возможно, континентов. Энергетические системы СССР связаны с девятью странами мира, в том числе с энергосистемами Финляндии, Норвегии и Ирана.

Примером крупнейшего междугосударственного энергообъединения может служить объединенная энергетическая система «Мир», созданная в 1962 г. и включающая в себя энергосистемы Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши, Румынии, Чехословакии и советскую систему «Львовэнерго». В 1972 г. выработка электроэнергии в этой ОЭС составила примерно 300 млрд. кВт·ч при установленной мощности 58,5 млн. кВт. Работа этой системы, руководимой Центральным диспетчерским управлением стран — членов Совета Экономической Взаимопомощи (находится в Праге), наглядно иллюстрирует жизненность и большие перспективы социалистической экономической интеграции. Осуществилось ленинское предвидение о том, что «современная передовая техника настоятельно требует электрификации всей страны — и ряда соседних стран — по одному плану...» *.

РАЗВИТИЕ СИСТЕМНОЙ АВТОМАТИКИ

Управление современными энергетическими системами невозможно без автоматически действующих устройств. На ранних этапах развития электроэнергетики основные усилия в области автоматизации электростанций и электрических сетей были сосредото-

* В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 44, стр. 280.

точены на совершенствовании релейной защиты. В процессе дальнейшего развития электрических станций и сетей, особенно в связи с созданием энергетических систем, возникла задача автоматизации и телемеханизации электрических систем.

Первые крупные работы по автоматизации и телемеханизации электростанций были выполнены в 20-х годах текущего столетия. Известно, что в силу специфических условий технологического процесса и, в частности, благодаря возможности в предельно короткий срок (3—5 мин) пустить в ход и поставить под полную нагрузку гидроагрегат, гидростанции проще поддаются автоматизации, чем тепловые станции. Это обстоятельство и определило первоначальную роль гидростанций в развитии автоматизации и телемеханизации.

В СССР первые автоматизированные гидростанции появились перед Великой Отечественной войной (Ереванская ГЭС, Ивановская ГЭС); некоторые гидростанции были автоматизированы во время войны, а к 1949 г. на телеуправление был переведен целый каскад гидростанций Узбекэнерго. В настоящее время автоматизированы практически все гидростанции, а некоторые из них переведены на работу без дежурного персонала.

Очень большое значение с точки зрения повышения безаварийности работы (автоматика действует быстрее и безошибочнее, чем персонал) и снижения численности обслуживающего персонала имеют телемеханизация и автоматизация подстанций и сетевых районов. Первая подстанция в СССР была телемеханизирована в 1950 г. (Южная подстанция в Узбекэнерго), а в 1954 г. были телемеханизированы уже 184 подстанции. В 1956 г. были телемеханизированы 10 сетевых районов.

Опыт эксплуатации электрических систем показал, что в 70—80% всех случаев коротких замыканий (из-за перекрытия изоляции) электрическая дуга гаснет и можно вновь включить отключившуюся цепь без каких-либо ремонтных работ. В связи с этим в 30-х годах были разработаны и началось внедрение устройств автоматического повторного включения (АПВ) как трехфазных, так и пофазных. Выше упоминалось об автоматических устройствах для регулирования напряжения генераторов с форсировкой возбуждения, которые стали применяться в качестве одного из средств повышения статической устойчивости. В 40-х годах в энергосистемах СССР начали внедряться методы компаундирования синхронных генераторов, разработанные в 1941—1943 гг. Институтом электротехники АН УССР. Схемы компаундирования со статическими выпрямителями были предложены еще М. О. Доливо-Добровольским в 1902 г., но тогда они не получили практического применения из-за несовершенства вентильных устройств, а также в связи с тем, что в то время эта проблема не стояла еще так остро, как сейчас.

Следующим мероприятием, повысившим надежность электроснабжения, явилось внедрение автоматической частотной разгрузки (АЧР). Устройства АЧР, внедряющиеся в электроэнергетику, служат для того, чтобы при аварийном отключении генераторов сохранить электроснабжение ответственных потребителей; это достигается отключением части потребителей с тем, чтобы не допустить перегрузки оставшихся в работе машин и, следовательно, не допустить снижения частоты в системе. Для восстановления электроснабжения после увеличения частоты применяется специальная автоматика повторного включения АПВ после АЧР (ЧАПВ).

В последние десятилетия электрические системы оборудуются также устройствами автоматического ввода резервных трансформаторов и линий (АВР), раз-

рабатываются устройства для регулирования частоты и распределения нагрузки между генераторами в пределах одной станции (Днепрогэс, 1952 г.) и между станциями в системе.

Кроме автоматических устройств общего типа, в современных энергосистемах получают большое распространение многочисленные автоматические устройства, действие которых направлено на возможно быстрое предотвращение, локализацию и ликвидацию нарушений нормального режима работы. Для получения информации о состоянии системы в целом и отдельных ее узлов и агрегатов применяются информационно-вычислительные машины. Закладываются основы автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ) Единой энергосистемой страны. В главе 10 будут приведены более подробные сведения об автоматизированных системах управления и применении вычислительной техники.

РАЗВИТИЕ ОСНОВНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

РАЗВИТИЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ, ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ И ТРАНСФОРМАТОРОВ

Электротехническая промышленность с начала текущего столетия, а в некоторых наиболее развитых странах с конца прошлого заняла место в числе ведущих отраслей. Представление о темпах роста выпуска электрических машин и трансформаторов можно получить из рис. 9.1, где он показан в относительных единицах.

Для каждого вида выпускаемых изделий существуют свои научно-технические проблемы и исторические закономерности. Однако можно перечислить некоторые тенденции, присущие развитию всех типов электрических машин и трансформаторов:

1. Все большее расширение областей применения привело к разнообразию в конструкциях и широкому диапазону мощностей машин и трансформаторов. Современные электромашины выпускаются на мощности от долей ватта (микромашины) до сотен тысяч киловатт (турбогенераторы). Длина и диаметр машин изменяются в пределах от сантиметров до нескольких метров, частоты вращения ротора — от нескольких до десятков тысяч оборотов в минуту. За последние годы особенно развилось производство специализированных электрических машин.

2. Значительное снижение удельного расхода активных материалов, уменьшение габаритов и веса машин на единицу мощности происходит при сохранении, а в ряде случаев и повышении их к. п. д. и способности к перегрузке.

Увеличение частоты вращения и мощностей машин при уменьшении их габаритов привело не только к росту механических напряжений в материалах, но и к значительному повышению электромагнитных нагрузок. Так, например, в современных машинах плотность тока в проводниках обмотки и количество ампер-проводников на единицу длины полюсного шага примерно вдвое превышают эти же показатели в машинах первых двух десятилетий нашего века.

Резкое снижение габаритов и веса машин, а также улучшение их технико-экономических показателей были обусловлены успеха-

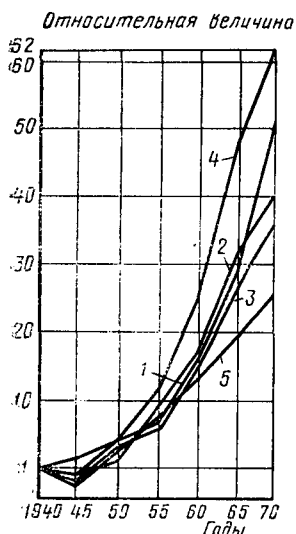


Рис. 9.1. Рост выпуска электрических машин и трансформаторов в СССР с 1940 по 1970 г.:

- 1 — объем валового выпуска электропромышленности;
- 2 — выпуск турбогенераторов (по мощности); 3 — выпуск трансформаторов (по мощности); 4 — выпуск крупных электрических машин (в штуках); 5 — выпуск электродвигателей до 100 кВт (в штуках)

мостью и малыми удельными потерями (в частности, холоднокатаная сталь, специальные сплавы), а также внедрение более легких проводниковых материалов без ухудшения их электропроводности (проводниковый алюминий и др.); расширение ассортимента материалов: немагнитная кованая и литая сталь, немагнитный чугун, хромо-никель-молибденовая сталь.

5. Значительное усовершенствование многих технологических производственных процессов, таких, например, как горячая штамповка, электросварка.

Трехфазные синхронные* генераторы с приводом от паровой или гидравлической турбины используются в качестве основных источников переменного тока**, устанавливаемых на электрических станциях.

* Термин «синхронная машина» введен Ч. П. Штейнмецем.

** Следует отметить, что в первые годы создания турбогенераторов наряду с машинами переменного тока строились и турбогенераторы постоянного тока, предельная мощность которых достигала 2000 кВт при 1500 об/мин. Однако

ми в области теории и расчета электрических машин, совершенствованием технологии их изготовления и внедрением новых, более прочных и более высококачественных магнитных и изоляционных материалов. Существенное значение при этом имели уменьшение добавочных потерь в машине и разработка более эффективных методов охлаждения и схем вентиляции.

3. Повышение надежности эксплуатации и долговечности машин достигается в основном за счет улучшения качества витковой и корпусной изоляции и совершенствования технологии ее изготовления. Повышенные теплостойкость, влагостойкость, механическая прочность изоляции были осуществлены за счет перехода на непрерывную компаундированную изоляцию крупных машин высокого напряжения (вместо гильзовой), покрытия витков бумажной или слюдяной лентой, внедрения стеклянных лент, стеклолакотканей, синтетических пленок. Особая роль в повышении надежности машин, а также уменьшении их габаритов принадлежит кремнийорганической и термореактивной изоляции.

4. Внедрение новых магнитных материалов с высокой магнитной проницае-

Современные типы конструкций роторов синхронных генераторов с явно выраженными полюсами (в тихоходных машинах) и в виде цилиндрического ротора с неявно выраженными полюсами (в быстроходных машинах) были разработаны в конце XIX в.

Первые синхронные генераторы работали с малой скоростью; они приводились в движение от паровых машин или двигателей внутреннего сгорания ременной передачей. При

этом оказывалось возможным подобрать для генератора наиболее благоприятную скорость вращения. Для нормальных машин с ременной передачей скорость ротора составляла 15—25 м/с. Однако с ростом мощности генераторов неудобства, связанные с наличием ременной передачи, привели к тому, что с начала 90-х годов прошлого века генераторы стали непосредственно соединять с вращающими их первичными двигателями. Это накладывало определенные ограничения на конструкции, так как частота вращения определялась первичным двигателем.

Первичными двигателями генераторов сначала служили паровые машины, которые строились до мощности 4000 кВт при частотах вращения до 260 об/мин. Для уменьшения неравномерности хода необходимо было увеличить инерцию вращающихся частей. В связи с этим были разработаны генераторы так называемого маховикового типа. Вращающиеся индукторы этих генераторов играли одновременно роль маховиков для первичного двигателя. На рис. 9.2 изображен типичный для конца XIX в. генератор Всеобщей компании электричества (АЕГ) на 600 кВт·А при 107 об/мин. Тихоходные синхронные генераторы приводились в движение также и от двигателей внутреннего сгорания. Наибольший из построенных синхронных генераторов, непосредственно соединявшихся с двигателем внутреннего сгорания, имел мощность 13 000 кВт·А, 94 об/мин и был установлен на Гамбургской электростанции. Тихоходные генераторы имели якорь очень большого диаметра при незначительной длине. Малая скорость вращения генераторов, приводившихся в движение поршневыми двигателями, требовала постройки генераторов с большим числом полюсов, что увеличивало расход активных материалов и потери в машине.

Одним из первых синхронных трехфазных генераторов, получивших практическое применение, был генератор, построенный

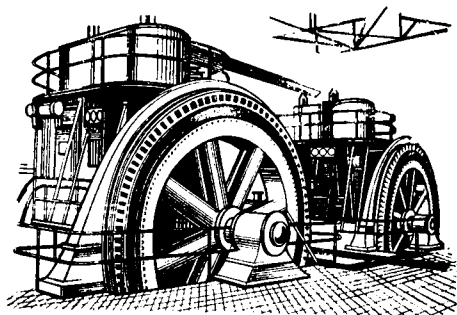


Рис. 9.2. Генератор фирмы АЕГ

сложность коммутации, а также меньшая надежность турбогенераторов постоянного тока привели (в особенности после внедрения переменного тока в промышленность) к их постепенной замене турбогенераторами переменного тока.

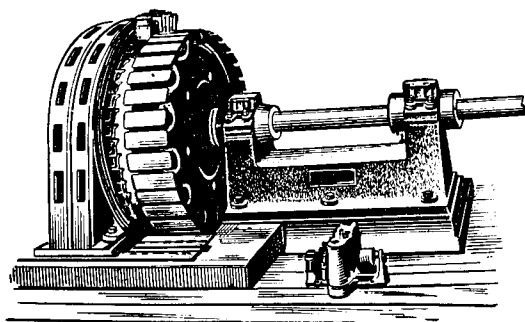


Рис. 9.3. Общий вид синхронного генератора фирмы «Эрликон» (1891 г.; ротор выдвинут)

швейцарской фирмой «Эрликон» по проекту Ч. Броуна (230 кВ·А; 95 В; 150 об/мин; $f=40$ Гц, $2p=16$) для Лауфен-Франкфуртской электропередачи 1891 г. (рис. 9.3). Привод генератора осуществлялся от гидротурбины. Внешний диаметр статора составлял почти 2 м (1,89 м) при длине машины 0,4 м. Стремление осуществить обмотку возбуждения, общую для всех полюсов,

привело к разработке специального гребенчатого (клювообразного) ротора. Обмотка возбуждения размещалась между двумя стальными щеками с когтеобразными выступами. Применяя всего одну катушку возбуждения, конструктор предполагал снизить мощность возбуждения и расход меди, однако он не учел, что большое магнитное рассеяние клювообразных полюсов при сравнительно малом магнитном потоке приведет к резкому колебанию напряжения при изменении нагрузки (что в действительности и имело место). Кроме того, общая вращающаяся обмотка возбуждения испытывает значительные усилия от центробежных сил, вызывающих разрушение изоляции. Подобный тип роторов сохранился в машинах небольшой мощности специального назначения.

Вполне закономерным явлением в электромашиностроении 90-х годов прошлого века являлась разработка разнообразных конструкций индукторных машин. Основным достоинством индукторных генераторов явилась возможность получения стандартной частоты при низких скоростях вращения, так как частота тока зависела от выбора числа зубцов индуктора. Конструкция индукторных машин (рис. 9.4) отличалась простотой и надежностью: катушки возбуждения и обмотка якоря размещались в неподвижном ярме; вращающийся индуктор с определенным числом зубцов вызывал изменение проводимости магнитной цепи, и в обмотке наводилась э. д. с. Индукторные генераторы имели большой диаметр и незначительную длину; в ряде конструкций выступы индуктора укреплялись непосредственно на маховике паровой машины.

С появлением паровых турбин, имеющих значительные скорости, возник новый тип быстроходного синхронного генератора — турбогенератор.

Первоначально роторы турбогенераторов имели явно выраженные полюсы, но при больших скоростях значительно возрастала механическая нагрузка на части ротора, а также увеличивались потери на трение о воздух. Поэтому роторы турбогенераторов стали изготавливаться с распределенной обмоткой возбуждения.

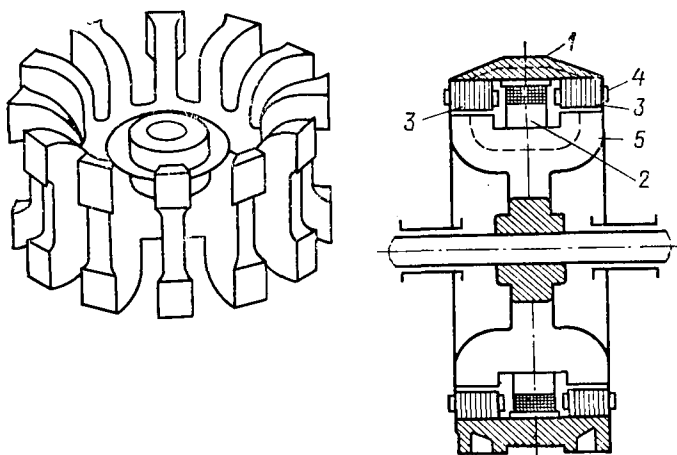


Рис. 9.4. Индукторный генератор:

1 — ярмо; 2 — обмотка возбуждения; 3 — зубцы; 4 — обмотка якоря;
5 — вращающийся индуктор (отдельно изображен слева)

Увеличение быстроходности и рост мощностей генераторов были непосредственно связаны с частотой переменного тока, получаемого от этих машин. Вначале не существовало общепринятой стандартной частоты, и только к концу XIX в. в Европе стала общепринятой частота 50 Гц, а в США — 60 Гц. Турбогенераторы в странах Европы строились с одной, двумя и тремя парами полюсов и скоростью соответственно 3000, 1500 и 1000 об/мин; в США при тех же значениях числа пар полюсов (но при $f=60$ Гц) скорость составляла 3600, 1800 и 1200 об/мин.

Успехи в области турбогенераторостроения в первой четверти текущего столетия характеризуются значительным ростом единичных мощностей турбогенераторов, увеличением частоты вращения (до 3000 об/мин) и повышением их технико-экономических показателей. Увеличение единичной мощности турбогенераторов объясняется значительными преимуществами машин большой мощности: уменьшение веса на 1 кВт мощности, уменьшение необходимой площади для установки агрегата, сокращение обслуживания обслуживаемого персонала. Так, например, если в 1904—1906 гг. максимальная мощность турбогенераторов находилась в пределах 1250 кВт (при 3000 об/мин) и 6300 кВт (при 1000 об/мин), то в 1913 г. она возросла (соответственно) до 6250—29 500 кВт, а в 1920 г. достигла уже 20 000—60 000 кВт.

Увеличение частоты вращения приводило не только к возрастанию экономичности турбин, но и значительному уменьшению веса и габаритов турбогенератора. Так, турбогенератор с $n=3000$ об/мин на 25% легче машины такой же мощности, но с $n=1500$ об/мин.

В последующие годы совершенствование методов расчета и технологии производства машин, а также использование более высо-

кокачественных магнитных и изоляционных материалов, применение более эффективных способов вентиляции позволили повысить надежность и экономичность машин при значительном снижении их веса и экономии активных материалов.

Так, внедрение сварных корпусов турбогенераторов вместо литьих привело к уменьшению веса машин почти на одну треть и значительно сократило производственный цикл. Применение двухслойной обмотки с конусным расположением ее лобовых частей (вместо расположения лобовых частей перпендикулярно оси машины) позволило на 20% сократить расход меди. Значительному повышению надежности обмотки ротора способствовало внедрение «запечки» * роторной обмотки.

В течение первой четверти XX в. почти в 5 раз снизился вес турбогенераторов на единицу мощности. Например, по данным фирмы «Дженерал Электрик», турбогенератор мощностью 5000 кВ·А, впервые построенный в США в начале XX в., весил 102 тс, а в 1920 г. генератор той же мощности весил 21 тс. Расход материала в турбогенераторе мощностью 500 МВт, изготовленном заводом «Электросила», составляет 0,65 кгс/кВ·А, тогда как в первых отечественных турбогенераторах он достигал 7,5 кгс/кВ·А.

Исключительно важную роль в повышении технико-экономических показателей турбогенератора (как и других крупных электрических машин) играет совершенствование методов вентиляции, так как при увеличении электромагнитных нагрузок машины заметно возрастает нагрев обмоток, при этом необходимость интенсификации охлаждения возрастает с увеличением мощности машины. Для турбогенераторов вначале применялась протяжная воздушная система вентиляции, но вследствие ее недостатков (наличие в воздухе пыли, влаги и т. п.) ** эта система была заменена вентиляцией по замкнутому циклу. В настоящее время все турбо- и гидрогенераторы мощностью свыше 4000 кВ·А имеют замкнутую систему вентиляции.

Замкнутая система вентиляции позволила применить в качестве охлаждающего газа водород, что способствовало значительному прогрессу в мощном турбогенераторостроении. Дело в том, что с ростом мощности и скорости вращения машин заметно возрастают вентиляционные потери и потери на трение ротора о воздух. Преимущества водородного охлаждения обуславливаются тем, что плотность водорода почти в 10 раз меньше плотности воздуха, а теплопроводность его в 7 раз больше, чем воздуха. Использование водородного охлаждения позволяет увеличить мощность машины на 25—30%, заметно повысить к. п. д. (1% и более), увеличить срок службы машины. Так, например, для турбогенератора (с водо-

* Заложенные в пазы ротора проводники при их запрессовке одновременно нагреваются проходящим по ним током.

** Насколько велико количество пыли, проносимой вентилирующим воздухом через генератор, можно судить хотя бы по такому примеру: если в генераторе задержится лишь 1% пыли, пронесенной через машину воздухом, то в течение года в генераторе мощностью 30 000 кВт оседет около 20 кг пыли.

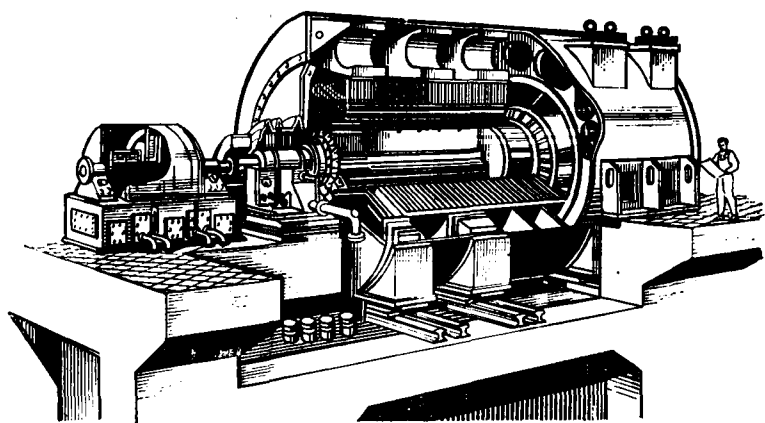


Рис. 9.5. Турбогенератор 200 МВт с водородным охлаждением

родным охлаждением) 100 000 кВт при $n=3000$ об/мин к. п. д. возрастает на 0,8—1,2% при полной нагрузке и еще больше при меньших нагрузках. В турбогенераторе 200 000 кВт потери на трение о воздух и на вентиляцию при воздушном охлаждении составляют 1195 кВт, а при водородном — только 140 кВт.

Первые попытки применения водородного охлаждения электрических машин относятся к 1923 г. (США). Затем эта система вентиляции была испытана на ряде крупных синхронных компенсаторов, и только с 1936—1938 гг. стали выпускаться (в США) мощные турбогенераторы с водородным охлаждением. В нашей стране работы по освоению водородного охлаждения проводились еще до Великой Отечественной войны 1941—1945 гг.

В 1943 г. на заводе «Электросила» началось проектирование крупнейшего для того времени турбогенератора мощностью 100 тыс. кВт, 3000 об/мин с водородным охлаждением, который был построен в 1946 г. *; в 1952 г. завод «Электросила» изготовил уникальный турбогенератор с водородным охлаждением на 150 тыс. кВт и 3000 об/мин, а в 1958 г. был построен турбогенератор 200 МВт с форсированной системой охлаждения (рис. 9.5). Прогресс отечественного турбогенераторостроения характеризуется, в частности, тем, что вес турбогенератора на 200 тыс. кВт меньше веса турбогенератора на 150 тыс. кВт, а использование активных материалов в нем повышено более чем в полтора раза.

В 50-х годах текущего столетия были разработаны методы более интенсивной форсированной водородной системы охлаждения обмоток статора и ротора, при которых осуществляется нагнетание водорода (при повышенном давлении до 2 ат) через каналы в про-

* До этого наиболее крупным турбогенератором, построенным заводом «Электросила», был турбогенератор на 100 тыс. кВт·А, 3000 об/мин с воздушным охлаждением (1937 г.).

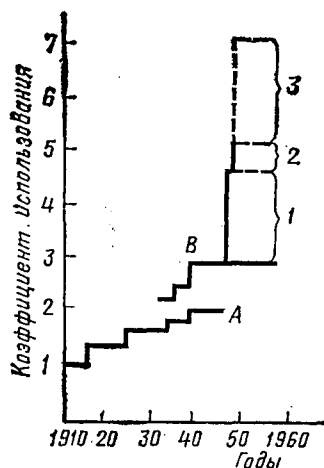


Рис. 9.6. Увеличение коэффициента использования турбогенераторов

водниках обмотки. Преимущества форсированного охлаждения обуславливаются непосредственным контактом охлаждающего газа с медью обмоток. Первый турбогенератор мощностью 60 МВт с форсированным охлаждением ротора был испытан в 1951 г. в США *.

На рис. 9.6 показано увеличение коэффициентов использования турбогенераторов с обычным воздушным охлаждением (кривая A) и водородным охлаждением (кривая B). Цифры 1, 2, 3 показывают эффект, достигаемый при постепенном улучшении форсированного охлаждения статора и ротора [давление водорода повышалось с 0,035 ат (1) до 1,75 ат (3)]. На основании экспериментальных данных можно заключить, что применение форсированного охлаждения позволило уменьшить общий вес генератора на 25%; вес активных материалов снизился на 40%.

Только мероприятия по повышению давления водорода при модернизации 277 отечественных турбогенераторов суммарной мощностью 12,9 млн кВт позволили получить дополнительную мощность 1,7 млн. кВт, что равносильно введению в строй крупной современной электростанции. В среднем модернизация системы водородного охлаждения у действующих агрегатов позволяет повысить мощность турбогенераторов на 11%. Внедрение высокоэффективных систем охлаждения продолжалось и при освоении промышленностью турбогенераторов мощностью 300, 500 и 800 МВт. В новых крупных турбогенераторах применены не только прогрессивные системы охлаждения, но и новейшие системы возбуждения, контроля и регулирования, терморезистивная изоляция стержней обмоток статора, эластичная подвеска активной стали статора. В настоящее время решается задача создания макетного образца турбогенератора с применением криогенной системы охлаждения обмоток.

Гидрогенераторы относятся к классу тихоходных синхронных машин, частота вращения которых находится в пределах 60—750 об/мин и определяется частотой вращения гидравлических турбин. Сложность проектирования гидрогенераторов определяется параметрами водотока и характером гидросооружения. Небольшие скорости гидрогенераторов обуславливают значительные размеры ротора при относительно малой его длине. Так, в гидрогенераторах отношение диаметра ротора к его активной длине превышает 10, тогда как в турбогенераторах это отношение снижается до 0,15.

* Первые предложения о непосредственном охлаждении обмоток относятся к 1909—1918 гг.

Исторически сложились две основные конструкции гидрогенераторов: с горизонтальным валом (для частот вращения более 200 об/мин)* и вертикальным валом (для меньших скоростей в низконапорных установках; позднее вертикальные машины стали строиться и для более высоких скоростей). Типовые гидрогенераторы большой мощности обычно выполняются с вертикальным валом, что определяется условиями общей компоновки гидросооружения.

Вертикальные гидрогенераторы еще с конца прошлого века стали изготовляться двух типов: подвесной, в котором подпятник находится над ротором (рис. 9.7, а), и зонтичный с подпятником, расположенным под ротором (рис. 9.7, б).

Подвесная компоновка обычно применяется для средних и высоких частот вращения (от 100 об/мин и выше), когда гидроагрегаты имеют большую длину и сравнительно небольшие диаметры. Для тихоходных агрегатов (до 100 об/мин) давление на грузонесущую крестовину оказывается слишком большим, что делает ее весьма громоздкой; в этом случае целесообразно использовать зонтичный тип гидрогенератора, нижняя крестовина которого опирается на выступы в шахте турбины и имеет поэтому меньшие размеры и вес; прогрессивно расположение подпятника гидрогенератора зонтичного типа не на крестовине (она исключается), а на конусообразной опоре, установленной на крышке турбины.

Размеры и вес гидрогенераторов одной и той же мощности приблизительно обратно пропорциональны частоте вращения, но очень большие скорости вызывают значительные механические напряжения в роторе.

Конструкция ротора, состоящего из вала, остова, обода и полюсов, претерпела ряд изменений. Применяются два типа ободов ротора: дисковый (неразъемный для машин при диаметре ротора до 4 м и разъемный — при диаметре 4—8 м) и спицевый (при диаметре больше 8 м). В быстроходных генераторах обод ротора совмещается с остовом. Как правило, остов ротора выполняется сварным

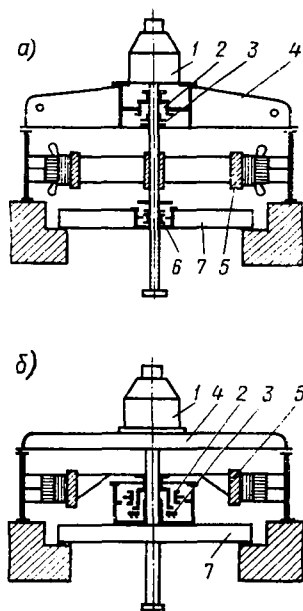


Рис. 9.7. Принципиальные схемы конструкций гидрогенераторов:

а — подвесной тип; б — зонтичный тип; 1 — возбудитель; 2 — верхний направляющий подпятник; 3 — подпятник; 4 — верхняя крестовина; 5 — ротор; 6 — нижний направляющий подпятник; 7 — нижняя крестовина

* Горизонтальные гидроагрегаты небольшой мощности иногда устанавливаются на совмещенных водосливных ГЭС.

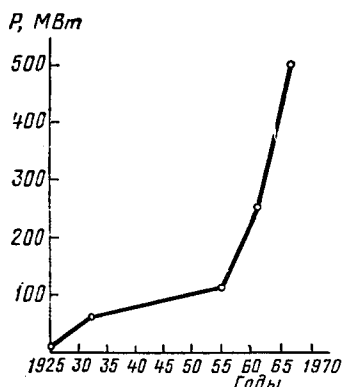


Рис. 9.8. Рост единичной мощности гидрогенераторов в СССР

и — реже — литым; корпус статора — сварной, из листовой стали.

Серьезной проблемой при создании гидрогенераторов является охлаждение. В уникальных машинах Красноярской ГЭС (500 МВт) охлаждение обмотки статора производится водой, а для обмотки полюсов применено форсированное воздушное охлаждение*. Охлаждение обмоток водой позволяет увеличить почти в два раза мощность гидрогенератора по сравнению с машинами воздушного охлаждения при тех же его габаритах. Расход активной стали на 1 кВт·А уменьшается примерно в 1,5—2 раза, меди — в 3—4 раза.

Рост мощности агрегатов (рис. 9.8)

требует улучшения использования и повышения качества всех активных и конструктивных материалов, применения новейшей технологии (в частности, сварных конструкций). Важную роль играет и применение новых изоляционных материалов. Так, например, применение изоляции на термореактивных связующих (типа «слюдотерм», «монолит», «ВЕС-2») позволило повысить примерно на 25% электрическую прочность и на 20% теплопроводность при рабочих температурах по сравнению с ранее применявшейся изоляцией на битумно-масляном связующем. С ростом единичной мощности повышалось напряжение гидрогенераторов от 6—11 до 15,75 кВ. Интересную конструкцию генератора высокого напряжения разработала кафедра электрических машин Московского энергетического института. У этого гидрогенератора, экспериментальный образец которого мощностью 20 МВт, построенный в 1968 г. заводом «Уралэлектротяжмаш», установлен на опытной Сходненской ГЭС под Москвой, напряжение на зажимах якорной обмотки составляет 110 кВ. В этом случае устраняется трансформатор, что дает значительный экономический эффект.

Одним из самых сложных и ответственных узлов гидроагрегата являются подпятники, испытывающие огромные нагрузки в несколько тысяч тонн. Применение новых конструкций, материалов и способов охлаждения позволило создать подпятники на небывалую нагрузку: 3000 тс с удельным давлением от 40 до 60 кгс/см².

Для разгрузки пяты мощных гидрогенераторов при начальных сдвигах ротора в условиях пуска были созданы специальные электромагниты с подъемной силой до 1200 тс.

В связи с ростом протяженности линий электропередачи все острее вставала проблема обеспечения статической и динамической

* Впервые такая система охлаждения была испытана на опытном гидрогенераторе Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС.

устойчивости работы гидрогенераторов, которая могла быть разрешена путем усовершенствований конструкции гидрогенераторов. Одно из таких усовершенствований — разработка быстроотзывчивых систем возбуждения. В течение многих лет возбуждение гидрогенераторов осуществлялось, как правило, электромашинными возбудителями, помещенными на валу генератора. Вследствие большой магнитной инерции тихоходные возбудители не могли обеспечить быстрого нарастания возбуждения. Поэтому последовательно с ними стали включать быстроходные агрегаты добавочного напряжения с безынерционными автоматическими регуляторами. Позднее в связи с успехами в области выпрямительной техники начали применять ионные системы возбуждения, а в последние годы — тиристорные.

Большое внимание было уделено разработке специальной автоматической аппаратуры, обеспечивающей надежную эксплуатацию гидрогенераторов: автоматика затормаживания гидроагрегата, контрольная аппаратура смазки и т. п.

Один из важнейших и наиболее распространенных элементов энергосистем и электроустановок — трансформатор. На 1 кВт установленной мощности генераторов в современных электрических системах падает до 10 кВ·А трансформаторной мощности и выпускается более 3 кВт электродвигателей.

По мере роста мощностей и напряжений линий электропередачи и развития электрификации промышленности и транспорта роль трансформатора все возрастала. Уже в начале XX в. возникла необходимость в разработке конструкций мощных трансформаторов для сетей 110, а позднее 220 кВ и более. В связи с этим научная и инженерная мысль была направлена на создание разнообразных конструкций трансформаторов с увеличенным числом обмоток, разработку методов увеличения электрической прочности изоляции, исследование электромагнитных процессов, возникающих в трансформаторах при коротких замыканиях и перенапряжениях, улучшение способов охлаждения, разработку эффективных систем регулирования трансформаторов под нагрузкой и совершенствование методов расчета трансформаторов. Необходимо было также освоить специальные трансформаторы, номенклатура которых значительно расширялась в связи с использованием электрической энергии в различных отраслях хозяйства.

Выше уже отмечалась основная тенденция в развитии электромашиностроения в текущем столетии — снижение веса машин и трансформаторов на единицу мощности. Иллюстрацией этой тенденции в трансформаторостроении может служить рис. 9.9.

Основные конструктивные типы современных трансформаторов — стержневой и броневой — были разработаны в середине 80-х годов прошлого века (см. гл. 6).

В первых конструкциях трансформаторов первичная и вторичная обмотки находились на разных сердечниках магнитопровода, но при этом не весь магнитный поток первичной обмотки пронизывал витки вторичной обмотки. В дальнейшем на каждом из сердеч-

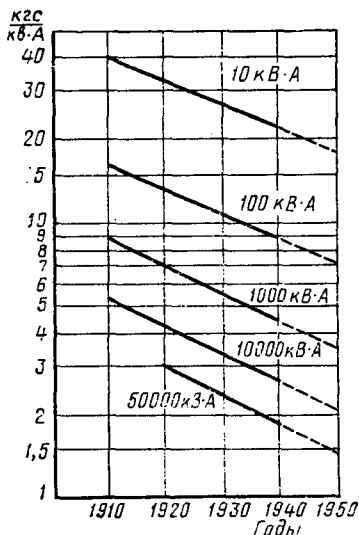


Рис. 9.9. Снижение веса на единицу мощности масляных трансформаторов (по зарубежным данным)

ников стали помещать части первичной и вторичной обмоток, располагая их концентрически. Кроме того, для уменьшения магнитного рассеяния в некоторых конструкциях трансформаторов (ча-

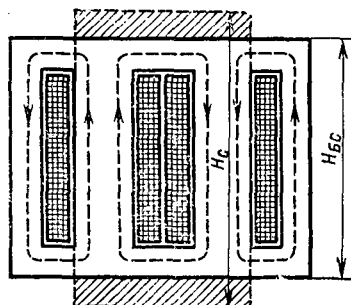


Рис. 9.10. Бронестержневой однофазный трансформатор:

$H_{бс}$ — высота сердечника бронестержневого трансформатора; H_c — высота сердечника стержневого трансформатора равной мощности

ще — в броневых) первичная и вторичная обмотки разбиваются на отдельные катушки, располагаемые на стержне в чередующемся порядке (дисковые чередующиеся обмотки).

Весьма характерным в трансформаторостроении является объединение преимуществ стержневых и броневого типов в одной конструкции. Так, современные трансформаторы большой мощности (до 100 тыс. кВ·А в одной фазе) и высокого напряжения (до 220—500 кВ) выполняются в виде бронестержневой или многостержневой конструкции с разветвленной магнитной системой (рис. 9.10). При этом снижается высота сердечника и облегчается перевозка трансформаторов в собранном виде по железной дороге.

Все шире начинают применяться многообмоточные трансформаторы. Такие трансформаторы устанавливаются в энергосистемах, а также в радиотехнических и автоматических устройствах, когда возникает необходимость во взаимной связи нескольких цепей или систем переменного тока.

Один трехобмоточный мощный трехфазный трансформатор заменяет два отдельных обычных трансформатора и позволяет получить на двух вторичных обмотках напряжения для питания потребителей, удаленных от электростанции на разные расстояния.

Одним из важных направлений в совершенствовании конструкции трансформаторов явилось улучшение системы охлаждения. Как известно, по способу охлаждения трансформаторы разделяются на сухие с естественным или искусственным охлаждением (по-

средством специальных вентиляторов) и масляные, в которых масло не только охлаждает сердечник и обмотку, но и улучшает изоляцию обмоток и предохраняет их от влаги и пыли.

Значительный прогресс в трансформаторостроении с начала 50-х годов был обусловлен внедрением новых, высококачественных материалов и, в частности, холоднокатаной электротехнической стали для изготовления сердечников. Эта сталь характеризуется высокой магнитной проницаемостью и малыми магнитными потерями в направлении проката. В результате использования холоднокатаной стали сечение и вес сердечников уменьшились, а потери в трансформаторе снизились на 20%. Это позволило уменьшить габариты охлаждающей системы (баки, радиаторы), в результате чего сократился общий вес трансформаторов. Большое распространение получили броневые и стержневые трансформаторы, сердечник которых намотан из ленточной холоднокатаной стали. Конструкция таких трансформаторов отличается высокой технологичностью и удобством для массового производства. Внедрение холоднокатаной стали знаменует новый этап в развитии трансформаторостроения.

Совершенствование методов расчета и технологии производства трансформаторов позволило увеличить их единичную мощность и заметно уменьшить габариты и потери в мощных трансформаторах высокого напряжения (рис. 9.11).

На рис. 9.12 показан внешний вид магнитопровода трехфазного трансформатора мощностью 206 МВ·А, 500 кВ, установленного в свое время на Волжской ГЭС им. В. И. Ленина. В настоящее время стоит задача повышения единичных мощностей силовых трехфазных трансформаторов до 1000 МВ·А и однофазных трансформаторов (в группе) до 1500 МВ·А. Новые серии силовых трансформаторов на напряжения до 500 кВ будут иметь сниженные на 15—20% вес и уменьшенные потери за счет применения холоднокатаной рулонной стали с жаропрочным изоляционным покрытием, новых конструктивных и изоляционных материалов, за счет создания более интенсивных систем охлаждения.

Большим достижением в конструировании трансформаторов следует признать освоение частично или полностью автоматизированных переключающих устройств, позволяющих регулировать напряжение под нагрузкой без разрыва цепи тока. Новая единая серия быстродействующих переключающих устройств для автомати-

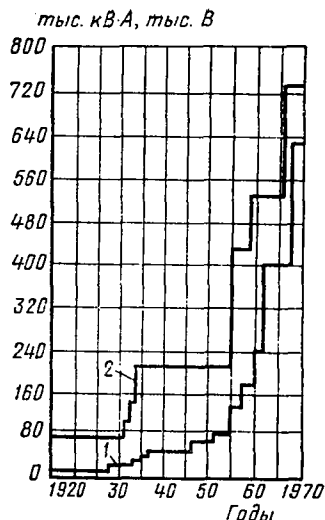


Рис. 9.11. Рост единичной мощности (1) и напряжения (2) отечественных трансформаторов

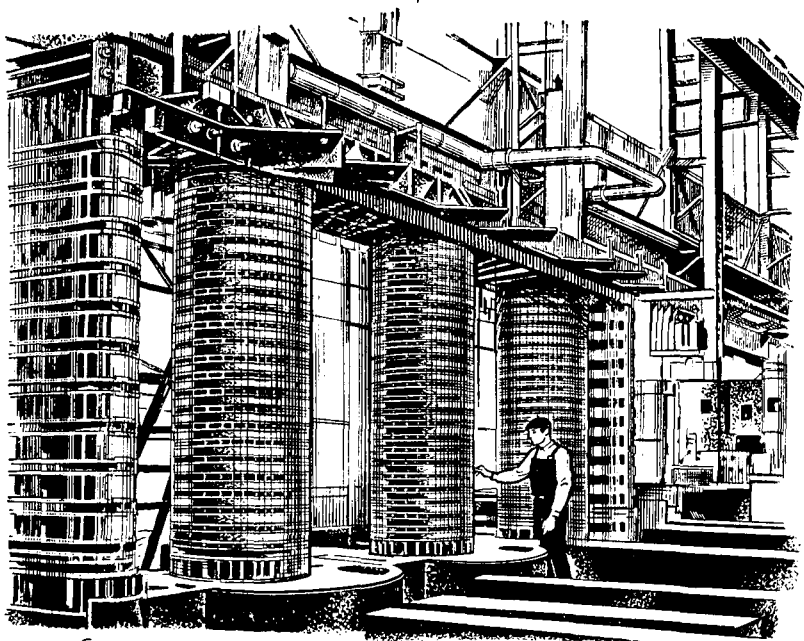


Рис. 9.12. Магнитопровод трехфазного трансформатора мощностью $206 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, 500 кВ

ческого регулирования напряжения и тока трансформаторов будет использована до напряжений 330 кВ и тока до 2000 А .

За последнюю треть века сильно развилось производство трансформаторов специального назначения: для преобразования числа фаз переменного тока (в электропечных установках), для выпрямительных установок, для преобразования частоты (удвоение и утроение частоты), для плавного регулирования напряжения и др. В радиотехнике, в устройствах промышленной электроники применяются специальные трансформаторы малой мощности. Выпускаются также разнообразные конструкции измерительных трансформаторов тока и напряжения.

В последнее время все более расширяется область применения автотрансформаторных схем, которые используются в мощных силовых трансформаторах. Это объясняется прежде всего рядом преимуществ автотрансформаторов (меньший расход материалов и сниженные потери, уменьшение реактивных сопротивлений), а также разработкой методов некоторой локализации их недостатков (например, переход перенапряжений из одной обмотки в другую).

РАЗВИТИЕ ОТКЛЮЧАЮЩИХ АППАРАТОВ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

На всех этапах развития электротехники одной из наиболее сложных проблем являлось отключение мощных электрических це-

пей. Высокие требования, предъявляемые к выключателям, вытекают из их функции надежно и быстро отключать электрические цепи не только под нагрузкой, но также и в аварийных условиях, например при коротких замыканиях, когда чрезмерное возрастание токов грозит разрушением основного оборудованию электрических станций.

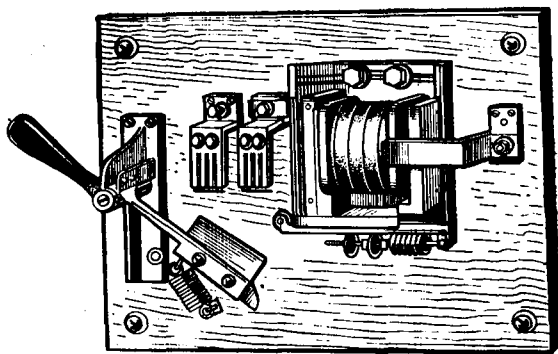


Рис. 9.13. Выключатель с пружинящими пластинчатыми контактами

Простейшая коммутационная аппаратура в виде различных переключателей появилась примерно в 20-х годах прошлого столетия в период интенсивного изучения действий электрического тока. Обычным типом контактных соединений в этих переключателях являлись металлические стержни, опускавшиеся в сосуды со ртутью. Достаточно вспомнить двигатель Дж. Генри или «коромысло Ампера», чтобы представить себе ранние устройства, предназначенные для изменения направления тока.

С возникновением энергетических применений электрического тока начинают создаваться различные конструкции выключателей сначала на низкие, а затем на все более высокие напряжения. Для всех выключателей, применявшихся до начала 90-х годов, характерным было наличие ртутных контактов. Такие выключатели, например, были установлены в 1887 г. на электростанции в Риме, работавшей на линию передачи с напряжением 2 кВ и током 200 А.

В 90-х годах прошлого столетия были разработаны различные конструкции подвижных контактных элементов. Например, в 1893 г. на Чикагской Всемирной выставке М. О. Доливо-Добровольский демонстрировал максимальный автоматический выключатель, в котором впервые были применены пластинчатые пружинящие (рубящие) контакты. На рис. 9.13 показан этот выключатель.

Со временем наравне с пружинящими контактами стали применять торцевые, щеточные, розеточные и пальцевые соединения.

При отключении электрических цепей силовых установок возникает электрическая дуга, опасная в пожарном отношении; она разрушает контакты и усложняет процесс отключения. Вся история развития выключателей тесно связана с изучением электрической дуги и способов ее гашения.

В настоящее время различают две основные группы выключателей: жидкостные (главным образом масляные) и газовые. В свою очередь масляные выключатели делятся на баковые (многообъемные) и малообъемные. В зависимости от среды, которая используется для гашения электрической дуги, газовые выключатели могут

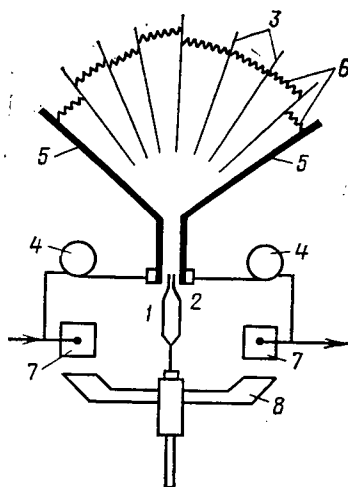


Рис. 9.14. Выключатель с деионной решеткой
М. О. Доливо-Добровольского:

1 и 2 — дугогасительные контакты; 3 — поперечные металлические пластины, образующие решетку; 4 — катушки магнитного дутья; 5 — рога; 6 — короткие дуги; 7 и 8 — рабочие контакты

быть воздушными или элегазовыми. К жидкостным относятся также водяные и выключатели со специальной жидкостью. В последние годы стали развиваться также вакуумные выключатели. Особенность исторического развития выключателей состоит в том, что почти все перечисленные типы и группы выключателей возникли практически одновременно в 90-х годах прошлого столетия, но на каждом этапе своего развития те или иные типы выключателей играли различную роль.

Наиболее распространенными в конце XIX и начале XX вв. были выключатели с гашением дуги в воздухе. В развитии этих выключателей можно выделить более ранний этап, для которого характерно применение выключателей с открытой дугой в воздухе, когда не предусматривалось применение каких-либо специальных средств для гашения дуги.

Открытое горение дуги в воздухе было опасно в пожарном отношении, а при неудачной конструкции распределительного устройства электрическая

дуга иногда перекидывалась на основные шины станции и вызывала короткое замыкание. При напряжениях свыше 15 кВ выключатели порой не могли разорвать дугу и приходилось предусматривать возможно более быстрое ослабление возбуждения генераторов с тем, чтобы снизить напряжение. Дальнейшее развитие выключателей с гашением дуги в воздухе оказалось возможным только при условии применения специальных дугогасительных устройств.

С 1895 г. началось применение роговых разрядников для защиты воздушных линий от перенапряжений. Для ускорения перемещения дуги между рогами стали применять магнитное дутье. Были разработаны конструкции камер выключателей, в которых с помощью специальных катушек создавалось магнитное поле; дуга, представляющая собой своеобразный проводник с током, под действием электродинамических сил перемещалась в этом магнитном поле. Примером такого устройства являются деионные решетки. Идея применения решетки из металлических пластин, установленных на пути движения дуги, состоит в том, что дуга разбивается на ряд коротких дуг; при этом число пластин выбирается таким, чтобы напряжение на каждой частичной дуге было ниже напряжения, необходимого для нового пробоя промежутка после погасания дуги при прохождении тока через нулевое значение.

Быстрое гашение коротких дуг экспериментально было исследовано еще в 1896 г. и в более поздние годы использовалось в конструкциях роликовых и пластинчатых выключателей. В этих выключателях в цепь тока включались тесно прижатые друг к другу несколько металлических пластин или роликов. При отключении эти пластины или ролики расходились, образуя между собой воздушные зазоры. Возникавшие в этих зазорах короткие дуги обычно погасали при первом же прохождении тока через нулевое значение.

Деионная решетка в современном ее виде была изобретена в 1912 г. М. О. Доливо-Добровольским (рис. 9.14) *.

С 1928 г. американская фирма «Вестингауз Электрик», а затем и ряд других фирм начали выпускать выключатели с деионной решеткой на различные напряжения и отключаемые мощности. Деионные решетки находят также широкое применение в контакторах, рубильниках и разъединителях.

Значительное применение в выключателях с гашением дуги в воздухе получила дугогасительная камера в виде узкой щели. Принцип гашения дуги при движении ее в сужающейся щели был также предложен М. О. Доливо-Добровольским еще в 1914 г.

Рост мощностей электростанций и напряжений в линиях электропередачи предъявлял все более сложные требования к выключателям. Воздушные выключатели ранних конструкций были громоздкими, токоведущие части их обязательно должны были находиться далеко одна от другой; выключатели проектировались так, чтобы они отключали лишь токи нагрузки.

После того как в конце XIX — начале XX вв. начали строиться очень крупные по тому времени центральные станции и линии высокого напряжения, когда потребовалось отключать не только рабочие токи, но и токи короткого замыкания, встал вопрос о переходе к более совершенным выключателям. Оказалось, что хорошей средой, способствующей быстрой деионизации дугового промежутка, является минеральное масло, которое и стало широко использоваться в масляных выключателях.

В первых конструкциях масляных выключателей (И. Томсон, Ферранти) и плавких предохранителей с масляным заполнением (Ферранти) разрыв контактов (или сгорание плавкой вставки) происходил в воздухе, а затем подвижный контакт уходил под слой масла. В качестве примера такого выключателя можно привести показанный на рис. 9.15 выключатель Ферранти, установленный в 1895 г. на Дептфордской электростанции. В этом выключателе впервые были применены специальные дугогасительные контакты.

* Процессы деионизации, происходящие при гашении дуги, описал в конце 20-х годов текущего столетия американский электротехник И. Слепьян, которому долгое время необоснованно приписывалось и само изобретение деионной решетки.

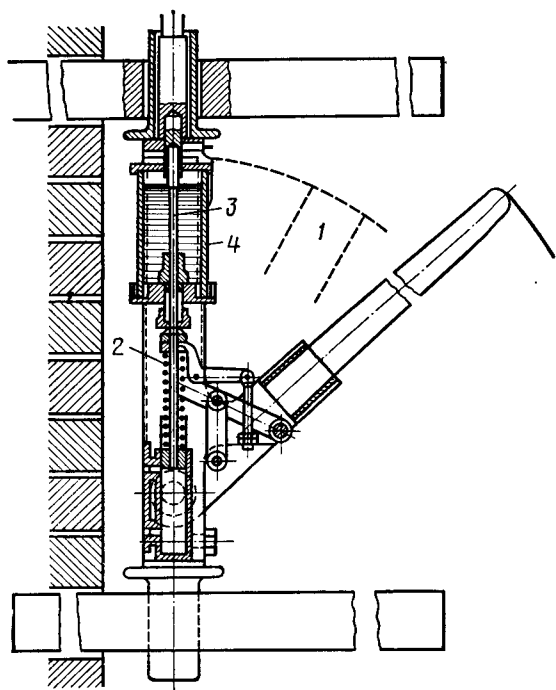


Рис. 9.15. Масляный выключатель Ферранти (3 кВ)

При отключении масляного выключателя сначала выходил из сцепления ножевой рабочий контакт 1, затем освобождалась пружина 2, быстро втягивающая дугогасящий контакт 3 в цилиндр 4, заполненный маслом.

Более совершенную конструкцию масляного выключателя разработал в 1898 г. Ч. Брун. Выключатели предложенной им конструкции имели на каждую фазу два рабочих контакта и четыре дугогасительных и отключали токи до 80 А при напряжении до 14,5 кВ. Дугогасительные контакты в выключателях Бруна находились глубоко под слоем масла и быстро разводились

под действием пружин. В Америке аналогичного типа выключатели были построены в 1898 г. Хьюлеттом.

В 20-х годах было замечено, что с ростом отключаемых мощностей и напряжений быстро растут габариты масляных выключателей, увеличивается объем масла и осложняется процесс отключения. Время отключения у таких выключателей довольно велико (до 0,15 с), и они способны разрывать лишь сравнительно малые токи короткого замыкания. Положение осложнялось еще тем, что в это время участились случаи взрывов масляных выключателей, сопровождаемых крупными пожарами. Впоследствии такие выключатели стали применяться лишь в установках небольшой мощности для напряжений до 10 кВ.

Значительным улучшением конструкции масляных выключателей явилось введение дугогасительных камер, в которых создавалось газомасляное дутье сначала за счет энергии, развиваемой гасимой дугой, а в более поздних конструкциях — за счет энергии от постороннего источника. Первый масляный выключатель с гасительной камерой (продольного дутья) был построен в 1908 г. американскими инженерами Хиллардом и Парсоном (рис. 9.16).

Интересно отметить, что применение дугогасительных камер в масляных выключателях началось только в 20-х годах текущего столетия, т. е. много лет спустя после их изобретения.

Большое распространение получили гасительные камеры с поперечным масляным дутьем, идея которых высказывалась еще в 20-х годах советским инженером В. И. Ильченко, а также в патентах фирм «Дженерал Электрик», «Всеобщая компания электричества».

Так же как и в выключателях с гашением дуги в воздухе, в масляных выключателях в 1930 г. стали применять гасительные камеры с узкой щелью. Для большей надежности отключения нередко использовали многократный разрыв цепи тока*. Например, в 1935 г. фирма «Вестингауз» установила на гидростанции Боулдер-Дэм масляные выключатели с гасительной камерой с узкой щелью и 10-кратным разрывом цепи тока. Эти выключатели были рассчитаны на напряжение 287 кВ и отключаемую мощность 2500 МВ·А.

Особую группу масляных выключателей составили выключатели с расширительной гасительной камерой (экспансионные выключатели). В них при достижении определенной величины давления внутри камеры отдельные звенья, из которых состоит гасительная камера, раздвигаются, и ионизированные газы вырываются сквозь образовавшиеся щели. Оказалось, что в такой камере создаются условия, весьма благоприятные для быстрого гашения дуги. Расширительная камера была изобретена в 1929 г. Ф. Кессельрингом (Германия) и получила в Европе довольно широкое распространение (рис. 9.17).

Начиная с 30-х годов широко применялись импульсные выключатели, в которых гашение дуги осуществляется за счет энергии, получаемой от постороннего источника, как правило, за счет энергии привода выключателя. Так, американская фирма ДЖИИ в 1935 г. изготовила импульсный малообъемный выключатель на 287 кВ, 2500 МВ·А с восемью разрывами цепи тока на каждую фазу и с давлением масла до 10 ат. Давление создавалось поршнем, связанным с приводным механизмом.

Конструктивное оформление малообъемных импульсных масляных выключателей оказалось неудачным: привод выключателя создавал большую ударную нагрузку на фарфоровые изоляторы и расшатывал крепление. Поэтому фирма ДЖИИ прекратила выпуск

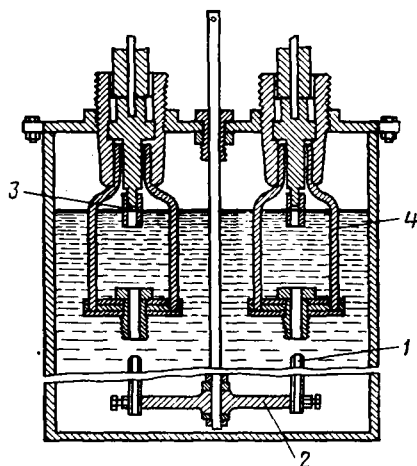


Рис. 9.16. Масляный выключатель с гасительной камерой:

1 — подвижные контакты; 2 — траверса; 3 — неподвижные контакты; 4 — цилиндрические гасительные камеры

* Идею одновременного многократного разрыва цепи для облегчения процесса отключения высказал еще в 1880 г. Т. Эдисон.

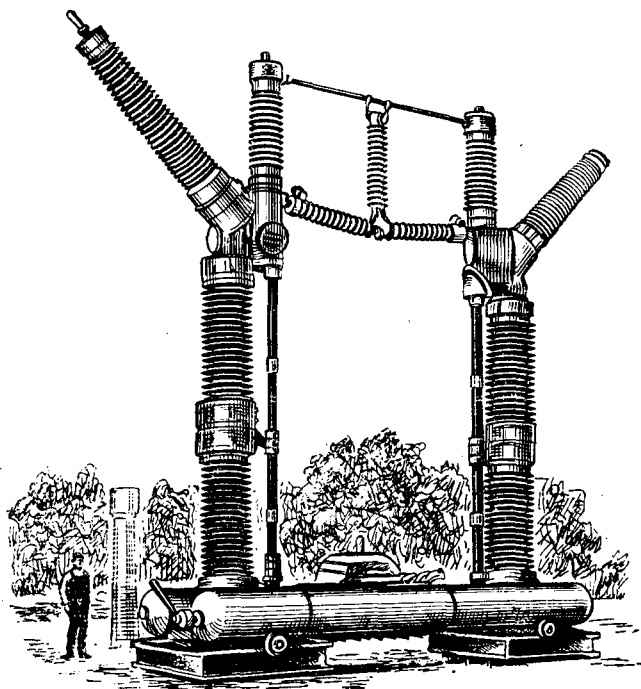


Рис. 9.17. Расширительный выключатель с масляным отъединителем 400 кВ, 12 000 МВ·А

этих выключателей и перешла на изготовление баковых импульсных выключателей. В 1955 г. был изготовлен баковый выключатель с максимальной мощностью отключения 25 000 МВ·А.

Малообъемные взрывобезопасные выключатели, получившие очень широкое распространение, требуют, однако, более высокого качества обработки деталей, технология их производства сложна, и поэтому они дороги. Применение любых жидких дугогасящих сред вызывает значительные эксплуатационные неудобства (хранение, заливка, спуск жидкости при ревизиях, защита от увлажнения и т. п.). В силу этого масляные выключатели хотя и продолжают выпускаться в настоящее время, но, по всей видимости, перспектив в будущем не имеют.

Многочисленные случаи взрывов масляных выключателей старых конструкций (особенно во втором десятилетии текущего столетия) заставляли ученых и инженеров изыскивать возможности создания более надежных безмасляных выключателей. Естественным было стремление заменить масло другой дугогасительной средой, в частности водой. Однако водяные выключатели не получили широкого распространения в силу присущих им недостатков: вода

быстро испаряется, зимой может замерзнуть, вызывает коррозию контактов.

С 1893 г. и до первых лет текущего столетия получили некоторое применение трубчатые выключатели, явившиеся предшественниками современных выключателей с газовым и воздушным дутьем. В первых трубчатых выключателях движение воздуха создавалось за счет образования вакуума внутри трубки при выходе из нее подвижного контакта. Затем в таких трубках стали делать газогенерирующие обкладки. Под термическим действием дуги эти обкладки выделяют газ, который способствует гашению дуги.

Однако такие выключатели работали ненадежно: при малых токах газовыделение было недостаточно интенсивным, а при больших токах трубки разрывались.

Мысль о применении газогенерирующих обкладок была реализована в 30—40-х годах текущего столетия в конструкциях автогазовых выключателей.

Очень широкое распространение в установках высокого напряжения получили выключатели с гашением дуги сжатым воздухом. Часто для простоты их называют воздушными выключателями.

Как и все другие описанные выше типы, выключатель с гашением дуги сжатым воздухом был изобретен в 90-х годах прошлого столетия. В 1897 и 1900 гг. немецкие фирмы АЕГ и «Гелиос» осуществляли гашение дуги в рычажных выключателях струей сжатого воздуха, подводимого в зону горения дуги по резиновым трубкам.

Особое внимание было обращено на воздушные выключатели лишь в конце 20-х годов, когда построение надежных, быстродействующих, взрывобезопасных выключателей на напряжения 220 кВ и выше стало неотложной задачей. Исследования, выполненные в 1925—1926 гг. немецким инженером Руппелем, показали, что условия для гашения дуги улучшаются с увеличением скорости истечения струи воздуха. Указанный эффект можно получить при помощи расширяющегося сопла. Исследования Руппеля привлекли к себе внимание многих инженеров и ученых, и уже с 1929—1930 гг. в разных странах стали создаваться удачные конструкции воздушных выключателей.

В качестве примера одной из первых удачных конструкций воздушного выключателя можно привести построенный в 1929 г. выключатель фирмы АЕГ (рис. 9.18). Под действием пневматического привода 4 и рычагов 5 подвижный контакт 3 отрывался от неподвижного контакта 2, выполненного в виде расширяющегося сопла. Одновременно в гасительную камеру 1 подавался сжатый воздух из бака 6. Этот выключатель при напряжениях до 15 кВ и давлении воздуха до 15 ат мог отключать мощность до 270 МВ·А.

В дальнейшем стали изготавливать воздушные выключатели с несколькими разрывами цепи тока, с большим разнообразием систем привода, с давлениями воздуха в баке до 55 ат, выключатели без внешних отделителей, с внешними отделителями и др.

В зависимости от напряжения воздушные выключатели имеют одну или несколько последовательно включенных гасительных ка-

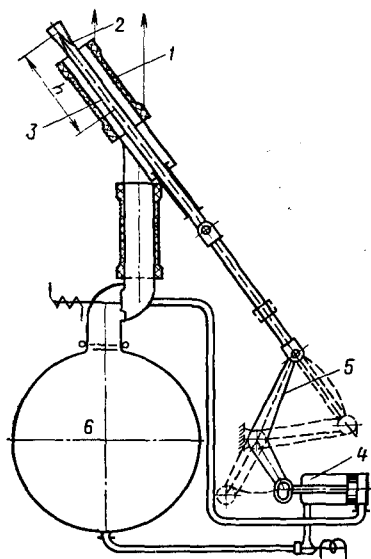


Рис. 9.18. Выключатель с гашением дуги сжатым воздухом (1929 г.)

мер. Так, например, при напряжении 35 кВ достаточно одной гасительной камеры, а при 400—500 кВ их уже требуется семь-восемь.

Воздушные выключатели благодаря своим достоинствам (быстродействие, надежность работы, сравнительно небольшие габариты) стали вытеснять масляные выключатели в крупных энергетических системах с напряжениями 220 кВ и выше. Лишь изобретение импульсных баковых масляных выключателей, оказавшихся более простыми и дешевыми, заставило ведущие американские фирмы в результате многочисленных экспериментов и дискуссий склониться в сторону изготовления баковых импульсных масляных выключателей. Однако по сравнению с Европой это лишь задержало прогресс американского электроаппаратостроения в области воздушных выключателей.

Воздушные выключатели по своим основным параметрам в настоящее время превосходят масляные, хотя они пока еще дороже и сложнее последних. Сейчас реальным стало выполнение воздушных выключателей с давлением 70 ат, однако это давление уже рассматривается как предельное из-за трудностей в создании достаточно надежных уплотнений и растущего влияния звукового эффекта при отключении (приходится разрабатывать специальные глушители).

В связи с укрупнением агрегатов электростанций (до 1200 МВт, а в перспективе и выше) и ростом напряжений (750 кВ и выше) возникли потребности создавать выключатели на отключаемые мощности, составляющие тысячи и десятки тысяч мегавольтампер (до 50 000 МВ·А). Время отключения напряжения 500 кВ не должно превышать 0,04 с. Работы по созданию таких сверхмощных и эффективных выключателей ведутся по трем основным направлениям: дальнейшее совершенствование воздушных выключателей с давлением воздуха до 50—70 ат с применением глушителей, разработка и совершенствование элегазовых выключателей, создание мощных вакуумных выключателей.

Возможность гашения дуги помимо воздуха различными «электроотрицательными» газами исследовалась еще до второй мировой войны. Лучшим из таких газов была признана шестифтористая сера (SF_6), открытая еще в 1889 г. Всесторонние исследования изоляционных и дугогасящих свойств этого газа было выполнено около 1940 г. в Ленинградском физико-техническом институте им.

А. Ф. Иоффе. Автор исследования Б. М. Гохберг назвал шестифтористую серу электротехническим газом, или «элегазом».

С середины 50-х годов элегазовые выключатели на любые напряжения (до 765 кВ) выпускаются в США, Японии, ФРГ, Италии. В СССР разработаны элегазовые отделители (для отключения рабочих токов) на напряжения до 220 кВ.

Развитие вакуумных выключателей началось в 50—60-х годах текущего столетия в СССР, США, Англии. В этих выключателях гашение дуги осуществляется в разреженной среде при давлении 10^{-5} — 10^{-6} мм рт. ст. Вакуумные выключатели пока еще весьма сложны, дороги и способны отключать лишь небольшие токи. Однако есть все основания ожидать появления в ближайшие годы их более совершенных конструкций.

В настоящее время ведутся поиски рациональных изоляционных конструкций (при напряжениях 750 кВ и выше расстояния между токоведущими и заземленными частями достигают 10 и более метров!), новых способов компоновки выключателей (например, подвесной тип), новых конструкций токоограничителей и т. п.

Весьма перспективным является развитие синхронных выключателей, работы по которым ведутся в последние годы в СССР, Японии, Франции, ФРГ и других странах. Принцип действия этих выключателей заключается в том, что при помощи специального синхронизирующего устройства отключение цепи начинается всегда в один и тот же момент: незадолго до перехода тока через нуль. Дело в том, что при размыкании контактов выключателя за 2—3 мс до перехода тока через нуль энергия, выделяющаяся в дуговом промежутке, может быть уменьшена в 5—10 раз по сравнению с вероятным выделением энергии без синхронизации. Принцип синхронизации может применяться в воздушных, элегазовых и вакуумных выключателях.

На рис. 9.19 приведена принципиальная схема синхронного выключателя. При замыкании контактов 1 подается команда на отключение, но работа выключателя начнется лишь после того, как в приемное устройство 4 поступит сигнал от синхронизирующего устройства 2, связанного с трансформатором тока 3. Синхронизирующее устройство заранее настраивается так, что оно подает импульсы в приемное устройство 4 каждый раз, когда до перехода отключаемого тока через нуль остается 2—3 мс. При совпадении сигналов от устройств 1 и 2 в устройстве 4 вспыхивает импульсная лампа, световой поток проходит по каналу 5 и поступает в устройство, вызывающее пробой искрового промежутка 6. При этом кон-

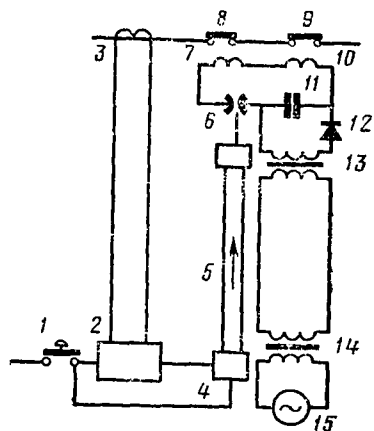


Рис. 9.19. Принципиальная схема синхронного выключателя

денсатор 11, заряжающийся от отдельного источника 15 через трансформаторы 13 и 14, разряжается на катушки 7 и 10, вызывающие размыкание контактов 8 и 9. Вентиль 12 исключает разряд конденсатора через обмотку трансформатора 13. Для уменьшения

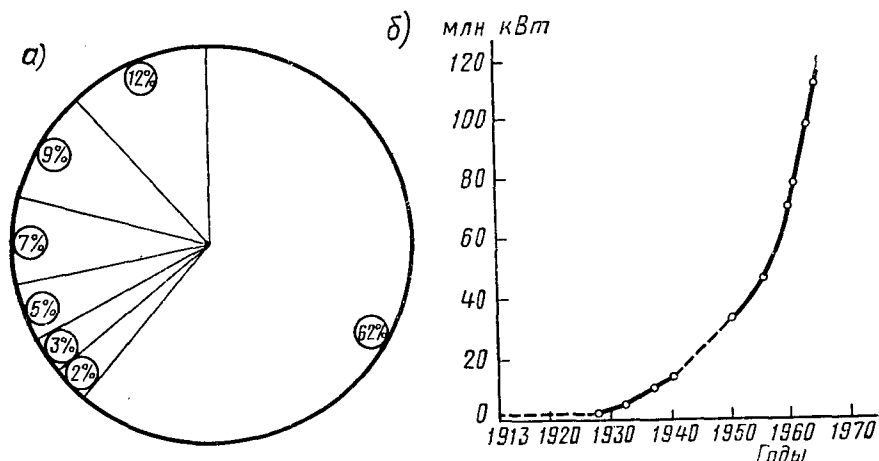


Рис. 9.20. Структура потребления электроэнергии в СССР в 1965 г. (а): 62% — электропривод; 12% — электролиз и электрохимия; 9% — электроосвещение; 7% — электротермия; 5% — электротранспорт; 3% — электросварка; 2% — телевизоры и связь; рост установленной мощности электродвигателей в промышленности СССР (б)

коммутационных перенапряжений при включении длинной линии может оказаться перспективным также применение синхронного включения.

В последние годы изучается возможность разработки отключающих аппаратов с бездуговой коммутацией при помощи управляемых полупроводниковых вентиляй.

РАЗВИТИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

К настоящему времени в развитии электрификации силового аппарата промышленности можно выделить три качественных этапа: одиночного электропривода, многодвигательного электропривода и — на современном этапе — автоматизированного электропривода. Переход от одного этапа к последующему отражал качественные сдвиги во всем комплексе электрификации промышленности. Задачи, решаемые при помощи электропривода, непрерывно усложнялись: электродвигатели все более и более приспособлялись к исполнительным механизмам, требования повышения производительности оборудования приводили к повышению скоростей и сложности движений механизмов, к увеличению их мощности, аппаратура управления становилась неотделимым элементом электропривода.

В развитии автоматизированного электропривода можно отметить несколько характерных периодов: применение релейно-контакторной аппаратуры управления (30—40-е годы), применение электромашиной автоматики и замкнутых

цепей с обратными связями (50-е годы), применение электромагнитной автоматики и электронно-ионных устройств (60-е годы) и в настоящее время — применение полупроводниковой автоматики и вычислительной техники.

Известно, что сердцем электропривода является электродвигатель. По мере развития автоматизированного электропривода усложнялись требования к электродвигателям в отношении их качества, надежности, долговечности, типизации, уменьшения потерь, снижения веса и габаритов, конструктивной приспособляемости. На рис. 9.20, а показана структура потребления электроэнергии в СССР в 1965 г., из которой следует, что почти две трети электроэнергии потребляется электродвигателями в промышленности и в быту, а на рис. 9.20, б показан рост установленной мощности электродвигателей.

Электродвигатели постоянного тока в текущем столетии не получили сколько-нибудь существенных изменений, если не считать заметного снижения их веса и габаритов, а также повышения надежности и долговечности за счет использования лучших материалов.

В ходе развития асинхронных двигателей основное внимание было уделено совершенствованию и увеличению единичной мощности короткозамкнутых двигателей.

Необходимость понижения пускового тока вызвала ряд конструктивных изменений в короткозамкнутом двигателе. В гл. 6 было показано, что впервые эта проблема получила свое разрешение в работах М. О. Доливо-Добровольского (позднее — в работах Бушера), создавшего двигатель с двойной беличьей клеткой.

Стремление упростить двигатель с двойной беличьей клеткой, а также устранить последствия неодинакового нагрева пусковой и рабочей обмоток (вследствие большего теплового расширения провода пусковой обмотки удлиняются больше проводов рабочей обмотки) привело к созданию короткозамкнутого двигателя с фасонными проводами, а затем двигателя с глубоким пазом, в который закладываются узкие высокие медные стержни (рис. 9.21). Этот тип двигателя был впервые построен в США в 1913 г., но более совершенная его разработка относится к середине 20-х годов.

Глубина паза возрастает при увеличении мощности машины. Так, например, в асинхронных двигателях мощностью более 120—

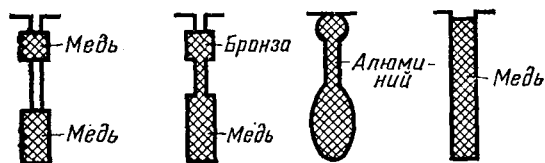


Рис. 9.21. Эволюция паза ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя с улучшенными пусковыми характеристиками

150 кВт применяются пазы, глубина которых составляет 50 мм при ширине 5—6 мм. Двигатель с глубоким пазом конструктивно проще и дешевле двигателя с двойной клеткой, но его недостатком является несколько более низкий $\cos \phi$, обусловленный повышенным магнитным рассеянием ротора. Поэтому применение разных типов короткозамкнутых двигателей зависит от конкретных условий системы привода.

Опыт эксплуатации асинхронных двигателей, накопившийся в первой половине текущего столетия, показал, что обычные короткозамкнутые двигатели целесообразно выпускать до мощности 10 кВт, при больших же мощностях — двигатели с двойной беличьей клеткой или глубоким пазом; последние применяются в приводах с тяжелыми условиями пуска. В последнее время из-за большей простоты двигатель с глубоким пазом используется чаще двигателя с двойной беличьей клеткой во всех случаях, за исключением мощных приводов, требующих высокого пускового момента.

Таким образом, одной из важнейших тенденций развития асинхронного двигателя в XX в. явилась разработка методов улучшения пусковых характеристик машин.

Рассматриваемый период развития асинхронных двигателей характеризуется также совершенствованием методов регулирования частоты вращения двигателей. Как известно, в регулируемых приводах преимущественное распространение имеют двигатели постоянного тока. Однако в ряде случаев по технико-экономическим соображениям оказывается целесообразным использование двигателей переменного тока.

В течение первой половины текущего столетия были разработаны и освоены различные способы регулирования скорости вращения асинхронных двигателей, из которых рассмотрим лишь один — переключение числа полюсов.

Располагая в пазах статора независимые друг от друга обмотки с различными числами полюсов и подключая эти обмотки к сети, можно получить различные скорости двигателя*.

Асинхронные двигатели с несколькими ступенями скорости вращения получили название многоскоростных и широко применяются в электроприводах. Обычно такие двигатели имеют две, три или четыре различные скорости. Применение многоскоростных двигателей в электроприводах станков значительно упрощает конструкцию станков (могут исключаться коробки скоростей) и управление ими, повышает к. п. д. станков. Серийный выпуск многоскоростных двигателей в нашей стране был начат в 1933 г.

Можно также отметить способ регулирования скорости с помощью каскадных соединений двух асинхронных машин, позволяющий получить три устойчивые ступени частоты вращения**.

* Обмотки с переключением числа пар полюсов были введены в 1897 г.

** Каскадное соединение двух асинхронных машин впервые было предложено в 1893 г. независимо друг от друга Ч. П. Штейнмецем и Г. Гергесом.

Развитию асинхронных двигателей в рассматриваемый период также свойственна основная тенденция прогресса электромашиностроения вообще — максимальное использование активных материалов, совершенствование методов расчета и конструирования машин, повышение их технико-экономических показателей.

Значительные улучшения были внесены в систему вентиляции двигателей; были внедрены аксиальная и радиальная системы, а также принудительное охлаждение поверхности статора машин закрытого типа.

Следует, однако, отметить, что стремление к максимальной экономии металлов и вызванное этим повышение электромагнитных нагрузок машины (в частности, имевшее место в 20-х годах) привели к заметному снижению $\cos \phi$ двигателя. В последующем необходимость повышения к. п. д. и $\cos \phi$ двигателя вызывала в ряде случаев увеличение расхода активных материалов.

По мере развития электрификации промышленности происходила неизбежная специализация электрических двигателей. Двигатели сложившихся стандартных типов, доведенные до высокой степени совершенства во всех отношениях, не удовлетворяли промышленность в тех случаях, когда новые производственные потребности входили в противоречие с конструктивными особенностями, которые прежде считались чуть ли не главными достоинствами двигателя. Так, например, во второй трети прошлого столетия было затрачено много усилий для того, чтобы сгладить пульсации вращающего момента двигателя постоянного тока. С этой целью увеличивали число электромагнитов в двигателях с явно выраженными полюсами, затем увеличивали число коллекторных пластин. И никому тогда не приходило в голову, что спустя столетие вновь придется возвратиться к электродвигателям, совершающим прерывистое, импульсное или, как теперь говорят, шаговое движение. Одним из первых шаговых двигателей был шаговый механизм, выполненный в 1831 г. Сальваторе дель Negro в виде электромагнита с храповым колесом.

В течение XIX и первых двух-трех десятилетий XX в. были разработаны многочисленные импульсные механизмы, питаемые от источника постоянного тока через механический коммутатор. Эти механизмы использовались в телефонии, телеграфии, в корабельной автоматике и других областях. Они стали элементами систем синхронной связи на постоянном токе. Однако развитие более совершенных следящих систем на базе контактных и бесконтактных сельсинов привело к вытеснению импульсных систем постоянного тока. Но в 40—50-х годах текущего столетия появился новый элемент автоматики — вычислительная машина. К этому же времени успехи электроники позволили разработать совершенные коммутаторы и преобразователи сигналов (например, полупроводниковые преобразователи постоянного тока в многофазную систему токов управляемой частоты).

Шаговые электродвигатели оказались именно таким электромеханическим элементом, который в состоянии «понимать» язык цифровой вычислительной машины. ЦВМ может, конечно, применяться

и с электродвигателями непрерывного действия, однако в этом случае требуется превращение аналоговой формы сигналов в дискретную и наоборот, что усложняет общую структуру автоматических систем. Напротив, применение шагового двигателя позволяет упростить систему, освободив ее от замкнутых обратных связей и цифро-аналоговых преобразователей.

В короткий срок в 50—60-х годах были разработаны многочисленные конструкции шаговых электродвигателей, представляющих собой в настоящее время синхронные электрические машины, обмотки которых возбуждаются обычно прямоугольными импульсами. Напряжение, частота и скважность импульсов могут изменяться в широких пределах. Переключение обмоток двигателя осуществляется потенциальным или импульсным электронными коммутаторами. Таким путем достигается квантование движения, позволяющее установить однозначное соответствие между числом и частотой импульсных команд, с одной стороны, и обработкой числа и скоростью «шагов», с другой.

В зависимости от конструкции ротора различают шаговые двигатели с активным ротором (на роторе размещены постоянные магниты или обмотки возбуждения и контактные кольца) и с пассивным ротором (зубчатый ферромагнитный цилиндр). В зависимости от числа обмоток статора различают однофазные, двухфазные и другие многофазные шаговые двигатели.

Еще одно интересное и перспективное направление в развитии электродвигателей связано со следующими соображениями. Как известно, первые электродвигатели с кольцевым и барабанным якорями не имели зубцово-пазовой структуры (см. гл. 5). Обмотка наносилась поверх гладкого ферромагнитного сердечника и закреплялась с помощью бандажей. Следовательно, занимая «междужелезное» пространство, эта обмотка не позволяла уменьшить воздушный зазор, а электромагнитные усилия были приложены непосредственно к активным частям обмотки. Стремление уменьшить эквивалентный воздушный зазор и привело в 1878 г. к замене гладкого якоря зубчатым. Позднее было выяснено, что при зубчатой структуре якоря проводники разгружаются от электромеханических усилий, которые в значительной степени переносятся на зубцы. Зубчатые якоря надолго стали типичной и, казалось, единственно целесообразной конструкцией вторичного элемента любой электрической машины.

В связи с успехами автоматизированного электропривода в середине XX столетия вновь пришлось пересмотреть сложившиеся взгляды. Дело в том, что зубцово-пазовая структура стала основной причиной коммутационных ограничений, которые приводят к ухудшению использования объема машины и ее динамических свойств. В результате ряда исследований в СССР (Киевский институт автоматики, Всесоюзный научно-исследовательский институт электромеханики), в Японии и других странах было признано целесообразным «вынести» обмотку якоря из ферромагнитного окружения, т. е. вновь вернуться к конструкции гладкого якоря. По-

строенные электродвигатели с гладким якорем обладают повышенными динамическими и регулировочными свойствами.

Новые возможности в развитии беспазовой конструкции якоря возникли с проникновением в электромашиностроение технологии печатного монтажа. Оказалось, что обмотка якоря может изготавливаться электрохимическим путем, подобно монтажу радиосхем. Впервые двухфазный асинхронный микродвигатель с торцевым воздушным зазором, тонким дисковым ротором и печатными обмотками на статоре выполнил французский инженер Ф. Раймонд в 1956 г. В следующем, 1957 г. французский инженер Ж. Анри-Бодо

получил патент на электрическую машину постоянного тока с печатными обмотками на дисковом якоре (рис. 9.22). Позднее были разработаны разнообразные конструкции электродвигателей постоянного тока с печатной обмоткой на якоре, в частности, двигатели с цилиндрическим тонкостенным якорем (например, конструкция, разработанная в Новосибирском электротехническом институте, позволила заметно повысить динамические свойства электродвигателя в диапазоне мощностей свыше 1 кВт).

Наконец, в качестве третьего примера эволюции идей в области электромашиностроения под влиянием автоматизированного электропривода приведем линейные электродвигатели или, точнее, электродвигатели с поступательным движением рабочего органа.

Возвратно-поступательное движение рабочего органа в электрических двигателях на заре их развития встречалось неоднократно. Однако в то время эти конструкции не были прогрессивными, они, напротив, свидетельствовали о том, что конструкторы не могли некоторое время освободиться от кинематической схемы поршневой паровой машины. К концу XIX столетия в электроприводе утвердилось безраздельное господство вращающихся электродвигателей. Однако многие производственные механизмы в качестве конечного имеют возвратно-поступательное движение. К таким механизмам относятся многие типы металлообрабатывающих станков, ударные механизмы (копры, молоты и т. п.), поршневые насосы, механизмы раздвижных дверей, зашторивания окон, подъемно-транспортные механизмы и т. д. Кроме того, поступательное движение свойственно любому транспортному средству вообще.

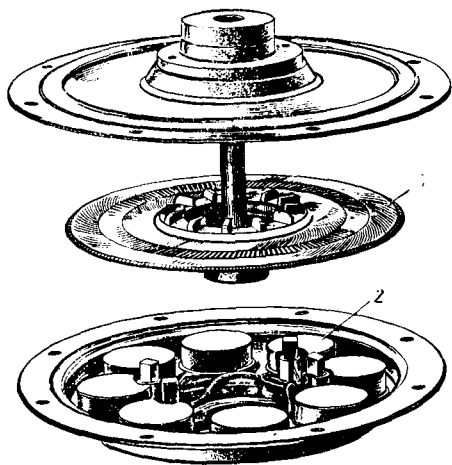


Рис. 9.22. Микродвигатель постоянного тока с печатным якорем в разобранном виде

1 — печатный якорь; 2 — полюсная система

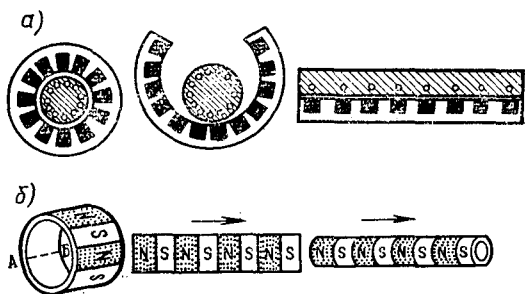


Рис. 9.23. «Превращение» обычного асинхронного короткозамкнутого двигателя в линейный (а); «превращение» обычного асинхронного электродвигателя в линейный цилиндрический (б)

звено, которое не только усложняет структуру и кинематику всего механизма, но и является часто источником отказов в работе, снижает долговечность и точность работы устройства. Так, уже в последние годы прошлого и с первых лет текущего столетий неоднократно предлагались различные конструкции электродвигателей поступательного движения для прокидки челнока в ткацких станках.

Самое простое решение в создании линейного двигателя заключается в том, чтобы «развернуть» в плоскость статор многофазного асинхронного двигателя. На поверхности такого плоского индуктора возникает бегущее магнитное поле, способное привести в движение любой металлический (в более широком смысле — проводящий) объект, находящийся в активной зоне индуктора. На рис. 9.23, а показано «превращение» обычного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в линейный асинхронный двигатель. В реальных двигателях возможны два различных исполнения: вторичный элемент (бегун) короче индуктора или, наоборот, индуктор короче вторичного элемента. Если бы они были равны (как на рис. 9.23, а), то при их относительном перемещении рабочая часть двигателя сокращалась бы. Возможно также двустороннее исполнение двигателя, когда вторичная часть (ферромагнитная или неферромагнитная) расположена между двумя индукторами.

В конце второго десятилетия текущего столетия появился цилиндрический линейный двигатель, принцип конструктивного образования которого можно понять, рассмотрев рис. 9.23, б: следует «разрезать» статор обычного асинхронного двигателя по образующей цилиндра АБ, развернуть его в плоскости, а затем свернуть снова вокруг оси, совпадающей с направлением движения бегущего поля. Получается своеобразная «электромагнитная пушка», способная разгонять или перемещать любой проводящий материал, помещенный внутри цилиндрического индуктора. Скорость движения магнитного поля в линейных двигателях зависит от величины

Исторически обстоятельства сложились таким образом, что привод механизмов поступательного и возвратно-поступательного действия стал осуществляться от вращающихся двигателей через различные более или менее сложные передаточные механизмы. Со временем эти преобразователи движения стали рассматриваться как лишнее

полюсного деления (τ) и частоты питающего напряжения (f):

$$v = 2\tau f.$$

В 20—30-х годах текущего столетия были выполнены исследования двигателей возвратно-поступательного движения (их называли «магнитофугальными»), однако тогда не удалось преодолеть два серьезных затруднения. Во-первых, для осуществления возвратно-поступательного движения и регулирования скорости можно было, воспользоваться лишь громоздкими электромеханическими преобразователями или специально созданными для такого рода операций генераторами, во-вторых, энергетические показатели двигателей с разомкнутым магнитопроводом оказались низкими из-за так называемых краевых эффектов (в двигателе с разомкнутым магнитопроводом кроме бегущего поля существует поле пульсирующее, оказывающее тормозящее действие).

Основополагающие теоретические исследования электродвигателей с разомкнутым магнитопроводом были выполнены в 40-х годах профессором Г. И. Штурманом в Харькове. В 50-х годах интерес к линейным двигателям стал возрастать. К этому времени были найдены первые способы компенсации краевых эффектов, построены электронные преобразователи частоты, пересмотрены некоторые консервативные взгляды на критерии качества электрических машин. Особенно большое практическое значение получили линейные индукционные электродвигатели с жидкометаллическим рабочим телом — так называемые магнитогидродинамические машины или жидкометаллические насосы. Фундаментальные исследования таких электродвигателей были выполнены в СССР под руководством профессора А. И. Вольдека [84].

Наконец, в 60-х годах в некоторых странах (Англия, Франция, затем США, ГДР, СССР, Япония и др.) начали создаваться конструкции линейных электродвигателей для транспортных целей, подъемно-транспортных механизмов и общепромышленного назначения. Большую работу по конструированию и пропаганде идей электропривода с линейными двигателями выполнил английский профессор Лэйтуэйт. На рис. 9.24 приведена фотография линейного секционированного электродвигателя с короткозамкнутой вторичной обмоткой, изготовленного во Франции и предназначенного для движения транспорта в виде системы платформ.

Интересную разновидность индукционного электродвигателя с разомкнутым магнитопроводом изобрел в 1930 г. ленинградский изобретатель П. А. Фридкин. Он предложил и впоследствии многие годы совершенствовал асинхронный электродвигатель с дуговым статором (изобретатель называл свой двигатель дугостаторным). Особенность дугового статора состоит в том, что он охватывает не всю окружность ротора, а только часть этой окружности на дуге, соответствующей некоторому углу α (рис. 9.25). Замечательной особенностью такого двигателя (как и линейного) является то, что его синхронная скорость (скорость бегущего поля) определяется частотой питающей сети и величиной полюсного деления, а не чис-

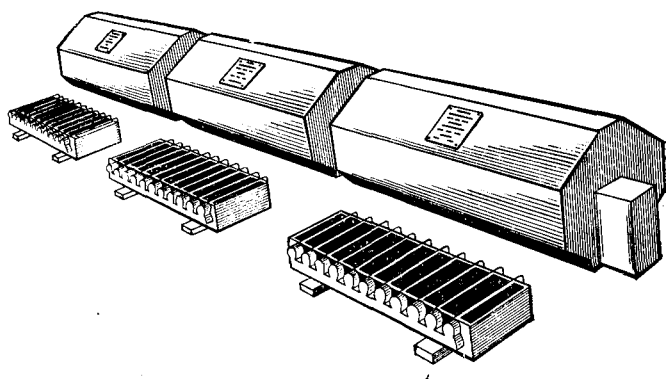


Рис. 9.24. Линейный секционированный электродвигатель

лом пар полюсов и частотой, как в двигателе нормального исполнения. Поэтому частота вращения ротора не образует дискретного ряда скоростей, кратных частоте сети.

Применение асинхронных двигателей с дуговым статором целесообразно прежде всего там, где имеются большие вращающиеся массы (барабаны, цилиндры и т. п.), а частота вращения является сравнительно небольшой. На рис. 9.26 показан винтовой пресс в традиционном исполнении и такой же пресс после замены фрикционного привода и клиноременной передачи дуговым двигателем.

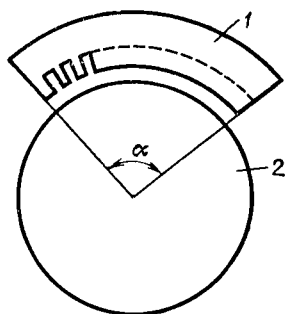


Рис. 9.25. Схематическое изображение асинхронного электродвигателя с дуговым статором:
1 — статор; 2 — ротор

В течение последних десятилетий благодаря новейшим достижениям в области научных, проектных и конструкторских разработок достигнут качественно новый уровень электрификации силовых процессов в промышленности. Этот уровень характеризуется системным подходом и широким внедрением электроники и комплектных устройств. Системы автоматизированного электропривода охватили прежде всего мощные виды машинного оборудования, такие, как доменное и прокатное оборудование, нефтебуровое оборудование, устройства шахтного подъема и вентиляции рудников и шахт, крупные индивидуальные станки, бумагоделательные машины и т. п.

Для станков с числовым программным управлением была разработана вся необходимая аппаратура. На рис. 9.27 показан общий вид вертикально-фрезерного консольного станка и система программного управления (слева). Производительность такого станка в 2—3 раза выше производительности универсальных станков.

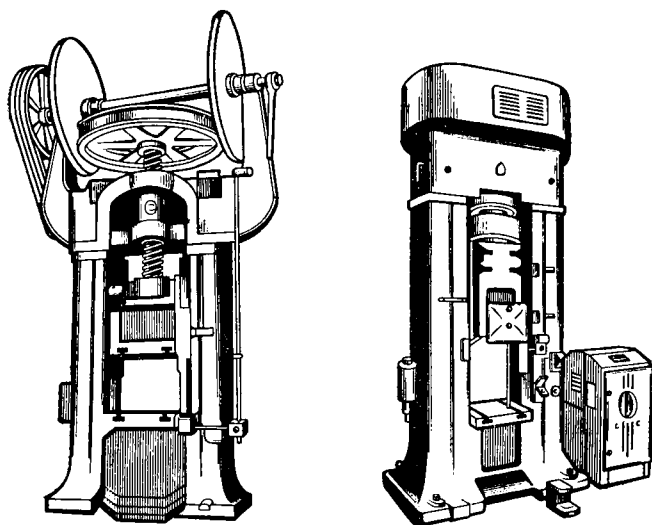


Рис. 9.26. Отечественный винтовой пресс до и после модернизации

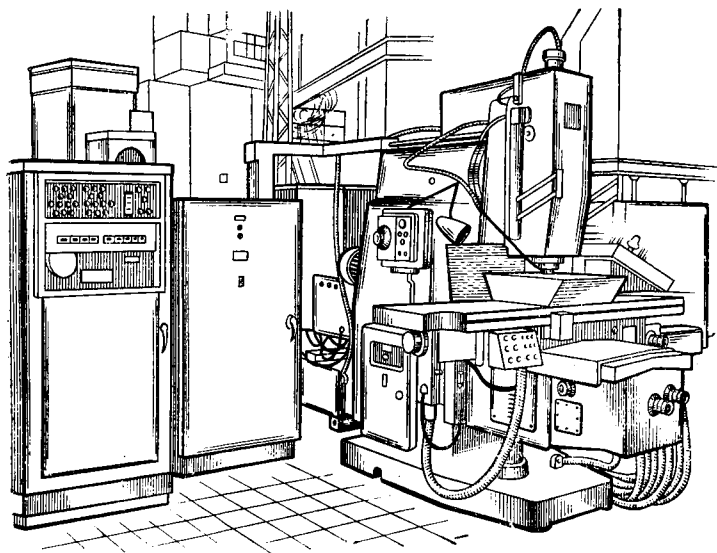


Рис. 9.27. Вертикально-фрезерный консольный станок модели 6P13ФЗ с числовым программным адаптивным управлением

Новые типы станков вызвали к жизни малоинерционные электроприводы, во второй половине 50-х годов в СССР был внедрен шаговый электрогидравлический привод. Значительное развитие получили системы бесконтактного управления на базе полупроводниковых логических элементов.

Новую главу в истории электропривода открыло применение тиристорных преобразователей. Преимущественное применение в настоящее время получают более дешевые и меньшие по габаритам тиристорные регулируемые электроприводы постоянного тока. В дальнейшем, с прогрессом полупроводниковой техники, возможно более широкое развитие тиристорных электроприводов переменного тока.

Развитие тиристорного привода приводит к еще большей специализации двигателей, выполняющих вполне определенные, свойственные тому или иному конкретному механизму функции. Здесь как раз уместны малоинерционные двигатели постоянного тока с гладким якорем или с печатной обмоткой на якоре, шаговые двигатели, линейные и др. В частности, линейные двигатели обычно и конструируются применительно к нуждам конкретного привода.

Есть все основания ожидать, что создание и освоение серий асинхронных двигателей А2 и АК2 мощностью от 100 до 1000 кВт, а также единой серии асинхронных двигателей А4 и АО4 общепромышленного применения мощностью от 0,6 до 100 кВт с улучшенными энергетическими и весовыми показателями приведет к дальнейшему повышению надежности, качества и увеличению срока службы промышленных электроприводов. Той же цели будут служить и новые, более экономичные и более надежные электродвигатели постоянного тока, а также универсальные двигатели малой мощности (до 1 кВт), созданные на основе единого конструкционного ряда для систем автоматики и бытовых приборов.

Наконец, следует отметить, что автоматизированный электропривод с числовым программным управлением позволяет осуществить выбор оптимального режима работы. Рождается новая система машин с адаптивным управлением. Автоматизированный электропривод превращается из вспомогательной части машинного устройства в его существенную часть.

РАЗВИТИЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Электрический транспорт во многих странах ныне является одним из крупных потребителей электроэнергии. Если электрификация городского транспорта получила значительное развитие еще на рубеже прошлого и текущего столетий (см. гл. 7), то ведущим видом электрического транспорта к середине XX столетия стал магистральный и пригородный железнодорожный электрический транспорт. О размерах и темпах электрификации железнодорожного транспорта лучше всего судить на примере нашей страны, давно уже вышедшей в этой области на первое место в мире.

Как уже указывалось (гл. 7), в дореволюционной России не существовало ни одной электрифицированной железной дороги. Электрификация железнодорожного транспорта у нас началась только в соответствии с планом ГОЭЛРО, в котором были сформулированы основные идеи и принципы решения «ударных задач транспорта». Первая железнодорожная электрифицированная линия открылась 6 июня 1926 г. на участке Баку — Сабунчи — Сураханы. Напряжение постоянного тока в контактной сети составляло 1200 В. Пригородная линия Москва — Мытищи длиной 18 км на постоянном токе напряжением 1650 В была открыта 29 августа 1929 г. В 1932 г. заводом «Динамо» были выпущены совместно с Коломенским паровозостроительным заводом первые в СССР шеститоксные электровозы постоянного тока напряжением 3000 В и мощностью 2040 кВт серии СС-11. К этому же времени было налажено производство мощных ртутных выпрямителей для тяговых подстанций.

Далее электрификация железных дорог начала набирать темпы. К концу 1935 г. было электрифицировано 1035 км, к концу 1940 г. — около 2000 км, к 1950 г. — 3050 км. В одном только 1960 г. было электрифицировано 2268 км железнодорожных линий. В 1958 г. СССР занял первое место в мире по общей протяженности электрифицированных железных дорог, а в 1968 г. протяженность таких дорог достигла 30,8 тыс. км, т. е. больше, чем в США, Франции, ФРГ и Англии, вместе взятых. Самая крупная в мире электрифицированная магистраль Москва — Байкал имеет протяженность 5500 км. Линия Ленинград — Ленинск имеет протяженность 3500 км. От западной границы (г. Чоп) до Байкала через Киев — Москву можно проехать по электрифицированной дороге 7200 км!

Вначале электрификация железных дорог развивалась исключительно на постоянном токе (обычно напряжением 3000 В). Однако со временем были изучены и сформулированы преимущества электротяги на переменном токе. К числу главных из них следует отнести: значительную экономию меди, сокращение вдвое числа тяговых подстанций, которые имеют только трансформаторы (без преобразователей) и не нуждаются в дежурном персонале, снижение в 3—5 раз потерь энергии в контактной сети, улучшение тяговых характеристик электровозов и др.

В СССР первый участок железной дороги Ожерелье — Павелец (137 км) был электрифицирован на переменном токе промышленной частоты в 1954—1955 гг. Принятое первоначально напряжение 20 кВ спустя 2 года было повышено до 25 кВ. Электрическая тяга на переменном токе в начале 60-х годов была принята в качестве основной. К концу 60-х годов на переменном токе были электрифицированы в нашей стране 37% от всех электрифицированных дорог. В СССР протяженность дорог, электрифицированных на переменном токе, превысила протяженность аналогичных дорог во всех зарубежных странах, вместе взятых.

В настоящее время на отечественных железных дорогах работают первоклассные электровозы и электросекции. К их числу можно отнести самый мощный в мире (8640 л. с.) электровоз переменного тока на кремниевых полупроводниковых приборах ВЛ—80* и электровоз с рекуперативным торможением ВЛ—60Р. Рекуперация — возвращение энергии в контактную сеть при торможениях и движении поездов на спусках — является эффективным средством экономии электрической энергии и повышения эксплуатационных качеств поездов.

Исключительно сложной оказалась проблема стыкования участков пути, электрифицированных на разных родах тока — постоянном и переменном. Пришлось оборудовать специальные стыковые станции весьма сложными переключающими устройствами.

В некоторых странах (Япония, Франция, Италия и др.) применяются электровозы двойного питания. Начато производство электровозов двойного питания (3 кВ постоянного тока и 25 кВ переменного тока) и у нас на Новочеркасском электровозостроительном заводе (ВЛ-82). В некоторых случаях использование таких электровозов экономически оказывается более выгодным, чем оборудование стыковых станций.

Огромное развитие в текущем столетии получили электротехнологические процессы. Электротехнология вызвала к жизни новые приемы получения конструкционных материалов и воздействия на них. В одних случаях ранее дефицитные или неизвестные материалы стали дешевыми и легкодоступными, в других случаях электротехнология позволила ввести точную обработку конструкций, которая была прежде просто невозможной.

Самой крупной и энергоемкой областью электротехнологии является электрометаллургия и, в частности, производство стали, меди и алюминия. В настоящее время работают крупные дуговые сталеплавильные печи емкостью от нескольких десятков тонн и даже емкостью 100 т с электромагнитным перемешиванием жидкого металла (при помощи специальной обмотки создается бегущее магнитное поле, приводящее в движение жидкий металл). Параллельно с выплавкой электростали развивалось и производство электроферросплавов. Ферросплавные и руднотермические электропечи достигают мощности 30 МВт и снабжаются автоматическими регуляторами режима. Широко применяется и другое электротермическое оборудование: высоковакуумные электропечи, индукционные электропечи промышленной частоты для плавки черных и цветных металлов, электропечи с применением кипящего слоя жидкометаллических теплоносителей. Ведутся энергичные исследования плазменных электротермических установок.

В машиностроении получили широкое применение методы индукционного и контактного нагрева под обработку давлением и для термической обработки деталей. Электропечи встраиваются в автоматические линии комплексной термообработки деталей. Только быстрый электрический нагрев может позволить нагревательным

устройствам работать в одном темпе, например, с кузнечно-прессовым оборудованием.

В самостоятельную область электротермии развилась техника электросварки. Вслед за дуговыми методами, получившими применение в конце прошлого и начале текущего столетий, в 30-х годах начала интенсивно развиваться контактная сварка. Последняя позволила достичь исключительно высокой производительности в различных производственных процессах и, в частности, в автомобиле-, авиа- и тракторостроении, в производстве тонкостенных труб.

Всему миру стали известны успехи Института электросварки АН УССР, где под руководством академика Е. О. Патона в 30-х годах был разработан отечественный способ автоматической дуговой сварки под флюсом, ставший впоследствии ведущим во всех отраслях промышленности. Для сварочного производства были разработаны специальные электрические машины и трансформаторы, а также источники питания с применением полупроводниковых приборов. Применяются специальные машины для конденсаторной сварки, сварки ультразвуком, плазменной сварки, сварки дугой, управляемой магнитным полем.

По мере развития новейших областей техники, таких, как ядерная энергетика, электроника, ракетостроение и космонавтика, потребовались новые конструкционные материалы, удовлетворяющие очень высоким требованиям в отношении прочности, нагревостойкости, радиационной стойкости. Требуемая точность обработки достигла области микронных измерений. Новые задачи удается решать главным образом путем новейших технологических приемов, среди которых ведущее место занимает электротехнология.

В настоящее время применяются следующие методы воздействия электричества на материал: электроэрозийные, электрохимические, ультразвуковые и лучевые. Эти методы позволяют получить весьма высокую чистоту поверхности, высокую поверхностную прочность и исключительно высокую точность обработки. Так, например, электроннолучевым способом обрабатываются тончайшие пленки и фольга, лучами лазера производится сверление микроскопических отверстий в твердых материалах и т. п. Все шире и шире начинает применяться плазменная струя для резки магния, алюминия, тугоплавких металлов и т. п., а также для нанесения покрытия из металлов, керамики, оксидов, силицидов и т. д. В производстве труб больших диаметров находит себе применение радиочастотная сварка. Сварка электронным лучом и лучом лазера применяется для соединения деталей в схемах микроэлектроники.

Продолжается интенсивное развитие электрохимических производств. Новые надежды в развитии электрохимии связываются с возможностями химических превращений в плазменной среде, в ядерных излучениях и в световом излучении лазера. Разрабатываются новые технологические процессы в сильных электростатических полях.

РАЗВИТИЕ АВТОМАТИКИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗВИТИЯ АВТОМАТИКИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Автоматика — отрасль науки и техники, охватывающая теорию и принципы построения систем управления производственными процессами, действующих без непосредственного участия человека.

Если раньше под автоматикой понимали выполнение определенных, часто повторных действий без участия человека, то в последние годы преобладающую роль начинают играть схемы и средства, обеспечивающие организацию и оптимизацию производственных процессов, автоматизацию управления ими. Формы участия человека в управлении производственным процессом иллюстрируются рис. 10.1 [85].

Развитие автоматики оказывает заметное влияние на энергетическую технику.

Разнообразные автоматические устройства были известны еще в древние и средние века, но никакой самостоятельной роли в производственном процессе не играли. Возникновение автоматики относится к периоду промышленного переворота XVIII в., когда отдельные элементы и автоматические устройства стали применяться для совершенствования процессов производства, замены искусной руки рабочего исполнительным механизмом.

В развитии автоматики условно можно выделить три основных периода: механики, электромеханики и радиоэлектроники [60]. Качественные особенности каждого из периодов определялись уровнем технических средств и областями их применения.

Период механики (до 70—80-х годов XIX в.) был наиболее длительным. Разнообразные механические устройства, получившие применение для целей автоматического регулирования, контроля и управления были освещены в предыдущих главах (например, среди первых устройств автоматики можно назвать автоматический регулятор питания котла, предложенный И. И. Ползуновым, автоматический регулятор скорости паровой машины Д. Уатта и др.). Уже в период господства механики начали зарождаться и постепенно все более развиваться электромеханические автоматические устройства.

Период электромеханики занимал приблизительно около 70 лет — с 80-х годов XIX в. до 40—50-х годов текущего столетия. В главах, посвященных развитию электромагнитных устройств, электрических машин, электрификации, уже были освещены наиболее примечательные электромагнитные регуляторы, в частности, для дуговых электрических ламп, телеграфное реле Шиллинга, устройства синхронизированного вращения в телеграфах, автоматический переключатель цепей Константинова — прототип современного распределителя — и многие другие.

В числе важнейших электроавтоматических устройств управления и контроля, разработанных в конце прошлого — начале XX вв., следует отметить: систему автоматической блокировки на железнодорожном транспорте (США, 1872 г.), автоматическую телефонную станцию (Россия, 90-е годы), автоматическую тяговую подстанцию (США, 1914 г.), автоматическую ГЭС и автоматизированный завод автомобильных рам (США, 1907 и 1920 гг.), первую автоматическую поточную линию (СССР, 1939 г.). В 20-х годах XX столетия создаются первые системы телемеханики (США), применявшиеся вначале для централизации управления тяговыми подстанциями, а позднее для управления энергосистемой. Начинают широко применяться разнообразные средства автоматизации производственных процессов на крупных промышленных предприятиях, в энергетике, на железнодорожном транспорте.

Как самостоятельная область техники автоматика впервые получила всеобщее признание в 1930 г. на 2-й Международной энергетической конференции.

В последние 25—30 лет в связи с бурным развитием электронных и полупроводниковых устройств, вычислительной техники все более явственно стали проявляться качественно новые сдвиги в области автоматизации производственных процессов. Этот период характеризует переход к комплексной автоматизации производства и созданию устройств автоматизации управления большими системами.

В свою очередь для перехода к комплексной автоматизации по-

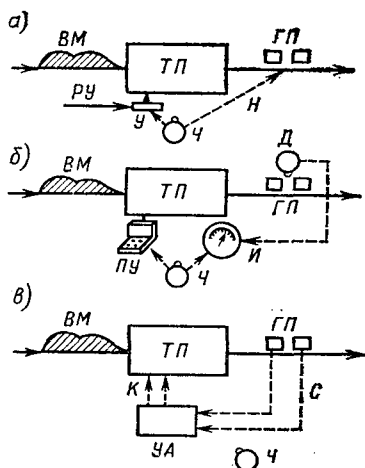


Рис. 10.1. Формы участия человека в управлении процессом:

а — непосредственное наблюдение за процессом и ручное воздействие на исполнительные органы; б — наблюдение по приборам и дистанционное воздействие на исполнительные органы; в — наблюдение за ходом управления, автоматически выполняемого техническими устройствами:

ВМ — вводимый материал; ГП — готовая продукция; Д — датчик; И — индикатор; К — команды; Н — наблюдение; ПУ — пульт управления; РУ — ручка управления; С — сигналы; ТП — технологический процесс; У — управление; УА — управляющий автомат; Ч — человек

требовалось расширить исследования по конструированию и производству автоматических быстродействующих вычислительных машин для решения сложных математических задач и счетноматематических машин для автоматизации управления производственными процессами. Предусматривалась разработка новых средств автоматики, основанных на использовании последних достижений физики, электроники и радиотехники.

Управление производственными процессами, происходящими при экстремальных температурах, давлениях, скоростях, требовало аппаратуры более высокого класса, обладающей быстротой и точностью действия. В связи с этим в устройствах автоматики преимущественное место начинают занимать элементы электронной техники, отличающиеся большей по сравнению с электромагнитными чувствительностью, точностью, безынерционностью. Наряду с электровакуумными и полупроводниковыми устройствами значительно усовершенствовались ферромагнитные элементы, магнитная бесконтактная аппаратура.

Переход к электровакуумным, полупроводниковым и магнитным элементам определил основное направление развития автоматических и телемеханических устройств, позволил резко увеличить их надежность и быстродействие при значительном уменьшении габаритов.

В середине 40-х годов создаются первые электронные вычислительные машины, положившие начало новому направлению в развитии автоматики — автоматизации процесса вычислений, обработке информации, моделированию сложных физических процессов, решению логических задач и др.

В 50-х годах в нашей стране были разработаны и внедрены в производство общепромышленные унифицированные приборы автоматического контроля и регулирования. Широкая автоматизация производственных процессов нашла яркое отражение в развитии комплексной автоматизации электростанций, разнообразного применения телемеханических устройств в энергосистемах, автоматизации и телемеханизации диспетчерского управления энергосистемами.

В конце 50-х — начале 60-х годов разрабатываются новые средства автоматики на основе элементов цифровой техники. Цифровые регуляторы начинают применяться для регулирования скорости турбин и приводов, в высокочастотных следящих системах.

Вместе с тем внедрение электронных и полупроводниковых устройств отнюдь не исключает использование механических, гидравлических, пневматических или электромеханических элементов и схем. Так, например, на новой основе получила развитие пневмоавтоматика — с приборами без подвижных деталей из унифицированных элементов с использованием печатных схем. Эта универсальная система элементов получила название пневмоники.

В послевоенные годы были проведены обширные исследования магнитных характеристик различных сердечников и разработаны конструкции магнитных усилителей (МУ), получивших широкое

применение благодаря надежности, большому сроку службы, высокому к. п. д., неограниченной мощности, взрывобезопасности, возможности суммирования большого числа сигналов и др. В частности, можно назвать первые серии универсальных МУ на 50 и 400—500 Гц, а также быстродействующие и высокоэкономичные МУ на основе сочетания с транзисторами. В последнее время расширяется область применения операционных магнитных усилителей (ОМУ), используемых для целей суммирования, интегрирования, дифференцирования и умножения в схемах автоматического регулирования и управления.

Следует отметить, что первый магнитный усилитель был предложен для усиления микрофонных токов звуковой частоты советским академиком К. И. Шенфером в 1920 г. (рис. 10.2).

На энергетических предприятиях началось применение систем экстремального регулирования — оптимизаторов, автоматически определяющих и поддерживающих оптимальные режимы работы объекта. В развитии телемеханики наметился переход к комплексным телеавтоматическим системам, в которых используются программные и логические блоки, обеспечивающие автоматическую последовательность операций технологических процессов.

В конце 50-х — начале 60-х годов были созданы новые вычислительные и логические элементы, на основе которых разработаны промышленные электронные моделирующие установки (типа ЭМУ), комбинированные вычислительные системы, создаются серийные полупроводниковые логические элементы, использующие в системах автоматического управления и обеспечивающие осуществление технологического процесса по выбранной оптимальной программе. В 60-х годах были разработаны оригинальные автоматические устройства для восприятия и преобразования информации. Отметим, в частности, перспективный электромагнитный метод неразрушающего контроля различных промышленных изделий, основанный на использовании метода вихревых токов.

В последнее десятилетие широкое развитие получила комплексная автоматизация производственных процессов в металлургической, машиностроительной, нефтегазовой, нефтеперерабатывающей, химической, пищевой, легкой и других отраслях промышленности, на железнодорожном транспорте, в сельском хозяйстве. Такая автоматизация дает наибольший экономический эффект, позволяет обеспечить более ритмичную и высокопроизводительную работу.

Например, управляющая цифровая вычислительная машина, обслуживающая крупные мартеновские печи, получая информацию о

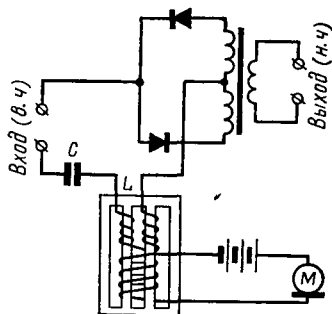


Рис. 10.2. Принципиальная схема одного из вариантов магнитного усилителя К. И. Шенфера:

Самондукция L изменяется «под действием силы постоянного тока, влияющего на магнитное насыщение сердечника» (из патентной заявки)

характере процесса, определяет закон воздействия на регулирующие органы, обеспечивает подачу топлива, воздуха, кислорода в соответствии с технологической инструкцией.

В Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 гг. указывалось: «Создать комплекс технических средств, обеспечивающих автоматизацию процессов регистрации, сбора, хранения, передачи и обработки информации, новые технические средства для единой автоматизированной сети связи страны... на основе широкого применения интегральных схем» *.

За последние годы внедрено много различных типов автоматизированных систем управления (АСУ), некоторые из них являются уникальными.

В 1974 г. на промышленных предприятиях было установлено около 10 тыс. комплектов механизированных поточных линий и 2 тыс. комплектов автоматических линий, переведено на комплексную механизацию и автоматизацию 5 тыс. цехов и производств. Создано 610 автоматизированных систем для учета, планирования и управления производством. Продолжается создание автоматизированных систем управления технологическими процессами на промышленных предприятиях: в 1974 г. таких АСУ было создано 150 (в 1,6 раза больше, чем в 1973 г.).

Успехи автоматики базируются на разнообразных и глубоких исследованиях в области теории автоматического регулирования, теории дискретных автоматических систем, нелинейных импульсных систем.

Для развития энергетической техники исключительное значение имели теоретические и экспериментальные исследования в области физического и математического моделирования. Разработаны теория и принципы построения электродинамических моделей, посредством которых стало возможным моделирование процессов в крупных энергосистемах. Получило развитие новое научное направление — кибернетика энергосистем — применение кибернетики к решению задач управления энергетическими системами, регулирования их режимами и выявления технико-экономических характеристик.

В Программе КПСС подчеркивается, что в СССР «автоматизация и комплексная механизация служат материальной основой для постепенного перерастания социалистического труда в труд коммунистический» **.

Технический прогресс в нашей стране будет определяться развитием новых наиболее совершенных автоматических устройств, увеличением их быстродействия, надежности, уменьшением веса,

* Материалы XXIV КПСС. Политиздат 1971 г., стр. 256

** Программа Коммунистической партии Советского Союза. Политиздат, 1974, стр. 67.

габаритов и потребления энергии. Исключительно перспективным шагом в этом направлении является все более расширяющееся применение интегральных микросхем.

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ

Современная электроника — это обширная область науки и техники, охватывающая изучение и применение электронных и ионных явлений в вакууме, газах, жидкостях, твердых телах и плазме, а также на их границах.

Техническая электроника связана с применением электронных, ионных и полупроводниковых приборов, устройств и систем в промышленности, связи, транспорте и других областях человеческой деятельности.

Далее будут коротко рассмотрены основные этапы развития отечественной промышленной электроники, точнее энергетической электроники, охватывающей область применения электронных устройств в энергетике, в промышленности, в автоматизированных установках регулирования, контроля и управления производственными процессами.

Как самостоятельная область науки и техники электроника начала развиваться в конце XIX — начале XX вв. В период ее становления решающее влияние на нее имело изобретение и развитие радио, да и в последующие годы радиотехника заметно влияла на использование электронных приборов в энергетике и технологии.

Зарождение радиоэлектроники

Зарождение радиоэлектроники относится к концу прошлого столетия. Открытие электромагнитных волн и их экспериментальное исследование (Д. К. Максвелл, Г. Герц) привели к созданию первых генераторов и индикаторов электромагнитных волн, положили начало разработке более совершенных приборов и устройств для возбуждения и приема этих волн.

Впервые на возможность практического применения электромагнитных волн для передачи сигналов на большие расстояния указал выдающийся русский ученый А. С. Попов в 1889 г. в своем докладе «Новейшие исследования о соотношении между световыми и электрическими явлениями».

Изобретению А. С. Поповым первого в мире радиоприемного устройства предшествовали его многочисленные эксперименты по созданию простого и надежного индикатора электромагнитных волн и автоматизации процесса восстановления его чувствительности.

Изучив работы английского ученого Лоджа и французского физика Бранли, экспериментировавших с простейшим когерером (стеклянная трубка с металлическими опилками), и исследовав электропроводные свойства порошков различных металлов, А. С. Попов создал более совершенный, безотказно действующий индикатор электромагнитных волн и предложил оригинальный

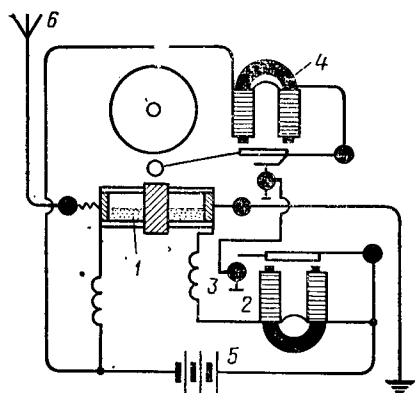


Рис. 10.3. Схема радиоприемного устройства А. С. Попова

метод встряхивания когерера с помощью электромагнитного звонкового реле. Присоединив к когереру вертикальный провод, он создал простейшую приемную антенну. Приемник А. С. Попова (рис. 10.3) работал следующим образом: при воздействии электромагнитной волны на когерер 1 металлические опилки слипались, сопротивление цепи уменьшалось, и якорь электромагнитного реле 2 притягивался и замыкал контактом 3 цепь: батарея 5 — звонковое реле 4; молоточек звонка притягивался к электромагниту, звонок фиксировал прием сигнала; при этом электри-

ческая цепь размыкалась, и молоточек звонка, возвращаясь в исходное положение, ударял по когереру и восстанавливал его чувствительность (6 — антенна). 7 мая 1895 г. Попов публично продемонстрировал свой первый радиоприемник, а в сентябре того же года, присоединив к схеме телеграфный аппарат Морзе, ввел запись принимаемых сигналов на ленту. Радиоприемник Попова представлял собой одно из наиболее совершенных электромагнитных автоматических устройств своего времени. Именно поэтому, а также вследствие большого влияния радиотехники на развитие промышленной электроники здесь кратко рассмотрены первые шаги радиотехники.

В 1896 г. итальянцем Г. Маркони был получен патент на радиоприемник, схема которого была идентична схеме А. С. Попова. Поддерживаемый крупными английскими промышленниками, Г. Маркони построил мощный радиопередатчик (около 15 кВт) и сложную антенну и в 1901 г. передал радиосигналы через Атлантический океан.

В течение первого десятилетия нашего века создаются разные конструкции радиопередающих устройств — искровые, дуговые, электромашинные, совершенствуются детекторы (магнитные, термические, электролитические).

Изобретение электронной лампы произвело переворот в радиотехнике. Действие электронной лампы основано на явлении термоэлектронной эмиссии, впервые наблюдавшемся Эдисоном в 1883 г. и известном под названием «эффекта Эдисона». Занимаясь усовершенствованием электрических ламп накаливания, Эдисон обратил внимание на то, что стеклянная колба лампы сравнительно быстро покрывается темным налетом, а угольная нить перегорает. Стремясь увеличить срок службы нити и выяснить причины потемнения колбы, Эдисон произвел ряд экспериментов и обнаружил, что между угольной нитью и пластинкой (рис. 10.4) проходит электрический ток. Вначале это явление не получило правильного объяснения, но

после открытия электрона было установлено, что Эдисон наблюдал эмиссию электронов.

Дальнейшее изучение процессов, происходивших в электрической лампе, внутри которой находился металлический электрод, соединенный с источником напряжения, показало, что подобное устройство способно пропускать ток только в одном направлении, т. е. служить выпрямителем. В 1904 г. английский ученый Д. А. Флеминг разработал конструкцию двухэлектродной лампы-диода и предложил применять его в качестве детектора в радиоприемных устройствах. Но диоды, будучи еще несовершенными электровакуумными приборами, около 10 лет не получали широкого применения.

Последующие многочисленные эксперименты с двухэлектродной лампой (Вайнтрауб, 1904 г.; Ли де Форест, 1907 г.) привели к установлению важного факта — возможности управления потоком электронов при помощи дополнительного металлического электрода — сетки. Такая конструкция трехэлектродной лампы получила название триода. Триод мог применяться не только для детектирования, но и для усиления электрических колебаний.

Исследования электронных ламп привели к открытию возможности использования триода в качестве генератора незатухающих электрических колебаний.

Над изобретением лампового генератора работали ученые разных стран; наибольшую известность получила схема лампового генератора, предложенная в 1913 г. австрийским ученым А. Мейснером. После 1916 г. когда были освоены более совершенные методы откачки ламп, наступил период «технической зрелости» электронной лампы и она стала основным элементом радиоэлектронных устройств. Важную роль в усовершенствовании первых конструкций приемно-усилительных и генераторных схем имели наряду с работами многих зарубежных ученых и инженеров труды наших соотечественников — Н. Д. Папалекси и М. А. Бонч-Бруевича. Так, М. А. Бонч-Бруевичем в Нижегородской радиолaborатории (организованной в 1918 г.) были созданы мощные генераторные лампы с водяным охлаждением и разработана теория триода. В этой же лаборатории О. В. Лосевым были проведены исследования кристаллических детекторов; усилитель Лосева известен под названием «кристадина».

В изучении электровакуумных процессов и расширении области применения электронных приборов большую роль сыграло откры-

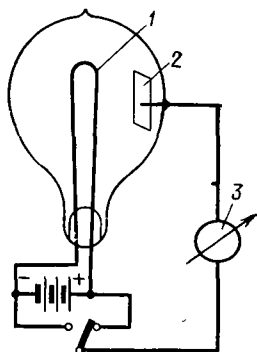


Рис. 10.4. Схема опыта Эдисона:

1 — нить накала; 2 — металлическая пластинка; 3 — гальванометр;

при присоединении пластинки к положительному полюсу батареи стрелка гальванометра отклонялась; при перемене полярности ток прекращался

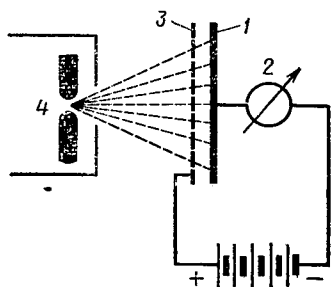


Рис. 10.5. Схема опыта

А. Г. Столетова:

1 — цинковая пластинка; 2 — гальванометр; 3 — металлическая сетка; 4 — дуга

тие явления фотоэлектрического эффекта (1887—1889 гг. Г. Герц, В. Галльвакс, А. Г. Столетов).

Наиболее полное исследование явления внешнего фотоэффекта принадлежит А. Г. Столетову, схема одного из опытов которого изображена на рис. 10.5. Им было не только доказано, что отрицательно заряженный проводник теряет заряд при освещении его лучами света, но установлен закон пропорциональности между фототоком и интенсивностью световых лучей. Важное значение для последующего практического применения фотоэффекта имело установление Столетовым безынерционности этого явления. Им впервые были проведены исследования фотоэффекта в условиях вакуума. Созданная для этих целей установка явилась, по существу, первым вакуумным фотоэлементом. Первые практически пригодные вакуумные элементы с катодами из щелочных металлов были построены в 1910 г. (Ю. Эльстер и Г. Гейгер).

Исследования свойств селена, приведшие к созданию фотоэлемента с внутренним фотоэффектом, начались еще в прошлом веке. В 1873 г. англичанином В. Смитом было описано явление уменьшения сопротивления селена под воздействием света, а в 1876 г. был создан (В. Адамсом и Р. Е. Деєм) селеновый фотоэлемент с запирающим слоем. Исследованием э. д. с., возникающих при освещении селена, занимался профессор Казанского университета В. А. Ульянин (1888 г.).

Исследования свойств селена, приведшие к созданию фотоэлемента с внутренним фотоэффектом, начались еще в прошлом веке. В 1873 г. англичанином В. Смитом было описано явление уменьшения сопротивления селена под воздействием света, а в 1876 г. был создан (В. Адамсом и Р. Е. Деєм) селеновый фотоэлемент с запирающим слоем. Исследованием э. д. с., возникающих при освещении селена, занимался профессор Казанского университета В. А. Ульянин (1888 г.).

Явление внешнего фотоэффекта лежит в основе разнообразных фотоэлектрических приборов, например фотоэлементов с внешним фотоэффектом. Внутренний фотоэффект используется в фоторезисторах, фотодиодах, фототранзисторах.

Развитие ионных преобразователей

В довоенный период развитие ионной техники в основном было связано с преобразованием переменного тока в постоянный (обратное преобразование — инвертирование — зародилось позднее). Ионные приборы развивались по двум направлениям, соответствующим типу их катодов: с жидким (ртутным) катодом (ртутные вентили) и с накаливаемым катодом (газотроны и тиратроны) [47].

В СССР первыми появились стеклянные ртутные вентили, изготовленные в 1921 г. Нижегородской радиолaborаторией для выпрямительной высоковольтной (на 4 кВ) установки Свердловской радиостанции. К концу 20-х годов было налажено производство высоковольтных (до 15 кВ) и низковольтных вентилях (250 В, 100 А).

Потребность в более мощных выпрямителях привела к созданию металлических вентилях, первый из них, 16-анодный, был построен в 1926 г. на заводе «Электро-

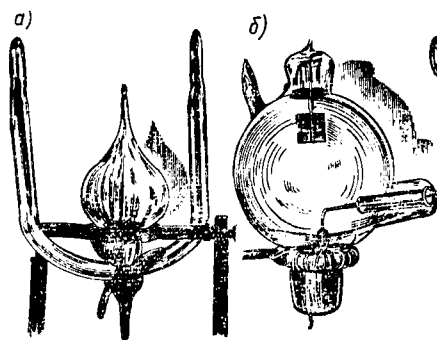


Рис. 10.6. Первый отечественный высоковольтный вентиль (1921 г.) (а); стеклянный игнитрон (1934 г.) (б)

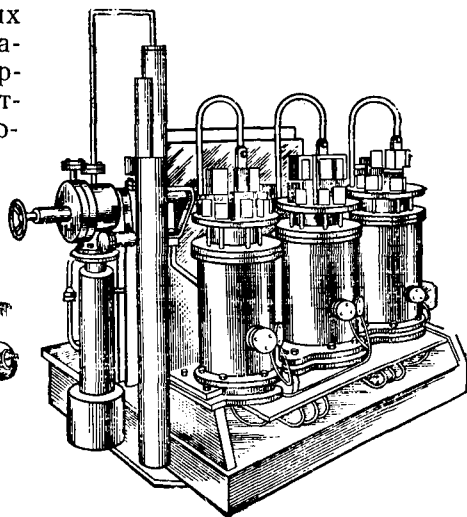


Рис. 10.7. Первый отечественный серийный выпрямительный комплект (1943—1944 гг.)

сила» (ток 500 А и напряжение 600 В). Расширение производства отечественных вентилях позволило уже в начале 30-х годов резко сократить импорт ртутно-преобразовательных установок.

В связи с индустриализацией страны резко возрос запрос на мощные преобразователи, в первую очередь со стороны электро-транспорта, металлургических и металлообрабатывающих предприятий. Конструкций вентилях совершенствуются введением анодного узла, препятствующего обратному зажиганию, а затем управляющих сеток. В середине 30-х годов создаются мощные вентиля на токи до 5000 А (в частности, для Московского метрополитена) и первые инверторы. В 1940 г. выпускаются вентиля с цилиндрическим корпусом мощностью более 4000 кВт.

В 30-х годах был разработан (в США) новый вид ртутного вентиля — игнитрона, более простого по конструкции, с полупроводниковым зажигателем, обеспечивающим кратковременную дугу зажигания в каждый период переменного напряжения. В нашей стране первые стеклянные игнитроны с карборундовым зажигателем были разработаны в 1934 г., а их серийное производство началось в 1936 г. (ток до 50 А, напряжение — 120 В). Первые отечественные высоковольтный вентиль и стеклянный игнитрон изображены на рис. 10.6.

В связи с применением игнитронов на электротяговых подстанциях потребовалось увеличить их мощности. Так были разработаны стеклянно-металлические и цельнометаллические игнитроны с водяным охлаждением (1938—1939 гг.). К этому времени относятся первые разработки мощных дугowych вентилях для дальних линий

электропередач. Проводятся исследования в области преобразовательных схем, в частности создаются преобразователи частоты для регулирования скорости асинхронных двигателей.

В годы войны (1943—1945 гг.) начинается новый этап в развитии ионных приборов — выпуск одноанодных металлических вентилях, первых вентильных комплектов (рис. 10.7). В конце 40-х годов разрабатываются серии более совершенных ртутных выпрямителей с сетками управления и автономной системой охлаждения, а в 50-х годах — многоанодные отпаянные ртутные вентили и одноанодные металлические игнитроны, а также ртутные вентили высокого напряжения для дальних линий передач постоянного тока. В эти же годы был создан другой тип вентиля — экзитрона, в котором в отличие от игнитрона дуга зажигания создается лишь перед включением вентиля, а поддержание вспомогательного катодного пятна осуществляется непрерывно существующей (дежурной) дугой возбуждения.

В настоящее время мощные ртутные вентили используются в преобразовательных установках, общая мощность которых достигает десятков миллионов киловатт. В установках с очень большими токами и высокими напряжениями ртутные вентили пока имеют преимущество перед мощными полупроводниковыми тиристорами (например, для передачи энергии постоянным током на дальние расстояния ртутный вентиль выдерживает рабочее напряжение более 100 кВ при токах, превышающих 900 А). Внешний вид высоковольтного ртутного вентиля с пробивным напряжением 130 кВ и максимальным током 900 А показан на рис. 10.8.

Ионные приборы с накаливаемым катодом — газотроны и тиратроны — начали изготавливаться в конце 20-х годов и в основном использовались в качестве преобразователей на меньшие токи и напряжения (по сравнению с ртутными вентилями). Первый патент на газотрон был предложен в 1905 г. в США, но более двух десятилетий не удавалось его реализовать из-за отсутствия теоретических разработок в области газоразрядных приборов. После освоения газотронов одна из американских фирм тщательно скрывала секрет изготовления даже внутри страны.

Впервые газотроны были применены в системах питания радиоустройств. В начале 30-х годов разрабатываются конструкции низковольтных газотронов, а в конце первой пятилетки в СССР создаются опытные экземпляры тиратронов. На рис. 10.9, б показан опытный образец тиратрона ТГ-162 на ток 40 А при обратном напряжении 15 кВ. В 1935—1937 гг. выпускаются серии тиратронов с ртутным и газовым (аргон, неон) наполнением. Однако срок службы этих приборов был невелик, и поэтому велось интенсивное исследование с целью усовершенствования их конструкций.

Заслуживает внимания тот факт, что для первых опытных передач электроэнергии постоянным током в 1937 г. был построен (на заводе «Светлана») тиратрон на ток 450 А и напряжение 20 кВ.

Для дальнейшей электрификации страны требовалось создание газотронов и тиратронов со стабильными характеристиками, боль-

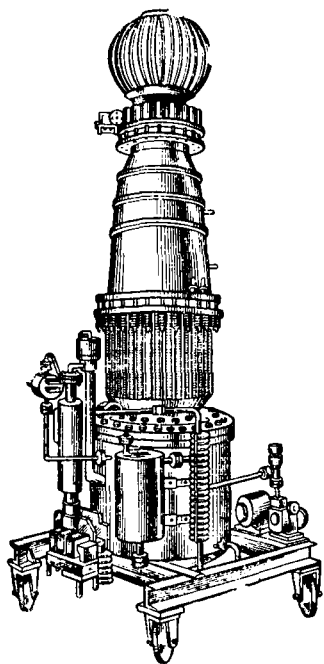


Рис. 10.8. Современный высоковольтный ртутный выпрямитель для линий передач постоянного тока

шим сроком службы, способностью работать при повышенных частотах. В конце 30-х годов разрабатываются газотроны полузакрытой и закрытой конструкций (большой полый анод частично или полностью охватывал катод),

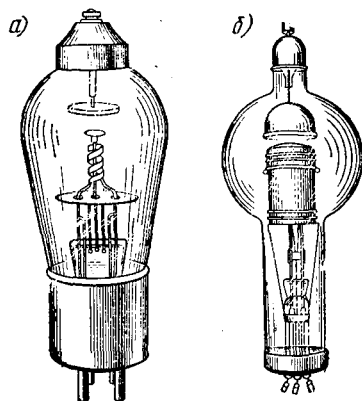


Рис. 10.9. Одни из первых отечественных газотронов (а) на максимальное обратное напряжение 5 кВ (1930—1931 гг.) и тиратронов (б) на ток 40 А

отличающиеся меньшим прямым напряжением и экономичностью. В это же время создаются новые типы экранированных тиратронов, имевших более стабильные характеристики и меньшие габариты. Уже в довоенные годы наши отечественные приборы превосходили по своим характеристикам многие зарубежные образцы.

В годы четвертой пятилетки осваиваются новые серии тиратронов с ртутным и газовым наполнением с предельным обратным напряжением до 3 кВ, а также маломощных тиратронов для систем регулирования и управления. Позднее стали применяться тиратроны с водородным наполнением, отличающиеся значительно меньшим временем деионизации.

В последние годы отечественные ртутные тиратроны изготавливаются на токи до 85 А и напряжением анода до 20 кВ. Применяются они в основном в низкочастотных мощных высоковольтных выпрямителях и инверторах. Тиратроны, наполненные инертными газами, используются в схемах автоматического управления и регулирования, в неуправляемых выпрямителях. Неимпульсные водородные тиратроны применяются в качестве вентиля в управляемых выпрямителях и в схемах инверторов на повышенных частотах.

Последние два десятилетия ознаменовались широчайшим развитием исследований и практических применений полупроводниковых элементов. Как известно, полупроводники по своей удельной электрической проводимости занимают промежуточное положение между проводниками и изоляторами и отличаются тем, что их электропроводностью можно управлять посредством внешних энергетических воздействий.

Свойства полупроводниковых элементов позволяют использовать их в качестве вентилях, усилителей, генераторов и преобразователей различных видов энергии в электрическую. Так, на основе фотоэлектрических свойств полупроводников созданы фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы; использование их термоэлектрических свойств дало возможность сконструировать терморезисторы, термоэлементы, термоэлектрические генераторы, термохолодильники и термостабилизаторы; способность полупроводников реагировать на механическое воздействие явилась основой для создания тензометров.

Первые исследования свойств полупроводников относятся еще к прошлому веку. В конце второй половины XIX столетия были построены первые термобатареи, фоторезисторы и кристаллические детекторы, но недостаточное понимание свойств полупроводников не способствовало расширению области их применения.

Толчком к техническому применению полупроводников, в частности полупроводниковых вентилях, явилось создание в 1926—1929 гг. (Л. Грондаль) меднозакисного вентиля. Основополагающая роль в разработке теории полупроводников и их техническом применении принадлежит советской школе физиков под руководством академика А. Ф. Иоффе. Эти исследования начали проводиться в конце 20-х — начале 30-х годов. Так было введено понятие дырочной проводимости, указано влияние примесей и температуры на механизм проводимости, повышение электропроводности в сильных электрических полях, разработана теория выпрямления. Важное практическое значение имели исследования фотоэлектрических свойств полупроводников.

Первые меднозакисные выпрямители начали изготавливаться в 1928—1930 гг. на электровакуумном заводе «Светлана», они применялись в схемах автоблокировки на железнодорожном транспорте. Разработка селеновых выпрямителей началась в 1938 г. Существенные успехи в довоенные годы были достигнуты в области изготовления фотоэлементов с запирающим слоем.

В 1940 г. во Всесоюзном электротехническом институте (ВЭИ) была разработана конструкция самовозбуждающегося синхронного генератора (75 кВ·А) с возбуждением от селеновых выпрямителей, получившего широкое применение в послевоенные годы. С 1943 г. по инициативе А. Ф. Иоффе начинается изготовление полупроводниковых термогенераторов. В это же время разрабатываются полупроводниковые терморезисторы, использующиеся

в схемах теплового контроля и автоматики. В США налаживается производство детекторов из германия и кремния, применявшихся в радиолокационных установках (выпрямляющие свойства германия и кремния были обнаружены в середине 20-х — начале 30-х годов).

В послевоенные годы в нашей стране значительно увеличилось производство малогабаритных терморезисторов, фоторезисторов и варисторов, которые получили широкое применение в автоматических устройствах управления и контроля. Современные типы фоторезисторов изображены на рис. 10.10. В 50-х годах были внедрены полупроводниковые зажигатели из карбида кремния, предназначенные для ртутных вентилях. Начинаются исследования полупроводниковых сплавов металлов — $ZnSb$, Mg_2Sn , Mg_2Ph , на основе которых были созданы термогенераторы, холодильники и микрохолодильники.

В конце 40-х годов были разработаны полупроводниковые триоды из германия, получившие название транзисторов (1948 г., Д. Бардин и У. Браттейн, США). Так было положено начало транзисторной электроники. Эти триоды выгодно отличались от электронных ламп малыми габаритами, меньшим потреблением энергии, надежностью действия. Например, средние размеры полупроводниковых диодов и триодов составляют $0,015—0,3 \text{ см}^3$, тогда как средний размер приемно-усилительной лампы $500—100 \text{ см}^3$. Мощность, потребляемая транзистором, составляет $0,001 \text{ Вт}$ и менее, а аналогичные лампы только на накал расходуют до нескольких ватт.

Первые точечные транзисторы в нашей стране были изготовлены в 1949 г. (А. Красилов, С. Мадоян). В 1951—1953 гг. отечественные заводы начали массовое производство германиевых триодов и диодов, а в последующие годы — мощных германиевых выпрямителей. Но недостатки германиевых приборов, проявляющиеся при температурах выше 50°C , заставили обратиться к кремниевым вентилям и триодам, выдерживающим температуру до $120—200^\circ \text{C}$.

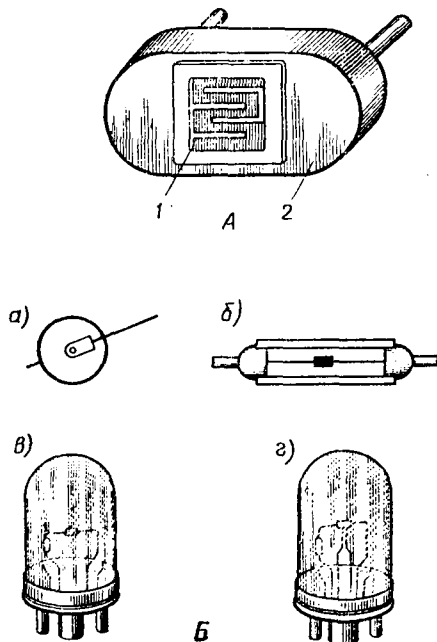


Рис. 10.10. Современные промышленные типы фоторезисторов (А):

1 — полупроводниковый слой; 2 — стеклянная пластина; (Б): а — малогабаритное; б — вакуумное для ВЧ; в — ТП-2 для цепей стабилизации; г — Т-8 — косвенного нагрева

В последнее десятилетие все шире применяются ферриты — ферромагнитные материалы, получаемые в результате химического соединения двухвалентных металлов (ни-

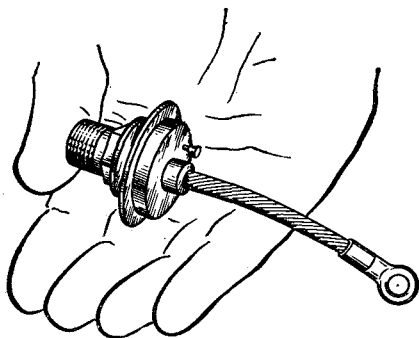


Рис. 10.11. Современный мощный полупроводниковый диод

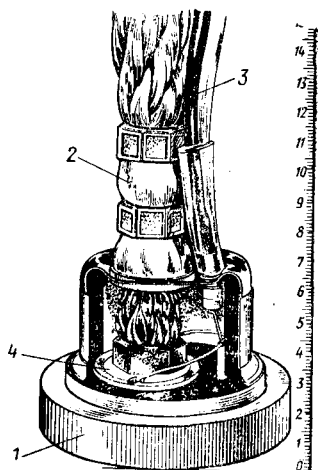


Рис. 10.12. Современный мощный управляемый тиристор:

1 — анод; 2 — катод; 3 — управляющий электрод; 4 — пластинка кремния

кель, марганец и окислы железа) или окислов металлов (цинк, кадмий и окислы железа). Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса используются для изготовления ячеек памяти и логических схем. Значительные преимущества отличают феррит-транзисторные ячейки, в которых сочетаются свойства ферритовых сердечников с усилительными свойствами транзисторов. Феррит-транзисторные ячейки применяются в устройствах вычислительной техники и автоматики.

Применение полупроводниковых приборов в электронике, автоматике, энергетике приобрело массовый характер. Все большее применение они находят в системах преобразования тока (выпрямление, инвертирование) и схемах управления электроприводами мощных полупроводниковых приборов. К ним относятся полупроводниковые диоды и тиристоры. Их преимуществами являются: высокий к. п. д., долговечность и надежность, небольшие габариты, возможность регулирования в широких пределах тока и напряжения.

Мощные полупроводниковые диоды изготавливаются преимущественно из кремния (рис. 10.11) и применяются в схемах выпрямления при напряжениях 1500—2000 В и токах до 1000 А.

В качестве рабочего элемента в мощных управляемых тиристорах используют четырехслойные кристаллы кремния с чередующимися *p*- и *n*-областями (рис. 10.12). Первые приборы такого типа были описаны в 1956 г. Современные серийные тиристоры имеют воздушное или водяное охлаждение и рассчитаны на токи 200 А и более. Их быстрое распространение обусловлено значительными

преимуществами перед тиратронами и другими ионными приборами, а также и транзисторами. Тиристоры не требуют подогрева, имеют малое падение прямого напряжения.

Одним из характерных направлений развития полупроводниковой электроники в последнее десятилетие является микроэлектроника.

Начало микроэлектронике было положено в Англии в середине 40-х годов созданием тонкопленочных деталей. Однако широкое практическое применение микроминиатюризация получила только после создания транзистора.

Микроминиатюризация (уменьшение веса, габаритов, потребляемой мощности) в сочетании с повышением надежности, экономичности и возможности автоматизации производства изделий явилась важнейшим шагом на пути совершенствования радиоэлектронной аппаратуры.

Новейшим перспективным направлением микроминиатюризации явилось создание интегральных схем (конец 50-х — начало 60-х годов). Такими схемами называют микроминиатюрные функциональные узлы электронной аппаратуры, в которых элементы и соединительные проводники изготавливаются в едином технологическом цикле на поверхности или объеме полупроводникового материала и имеют общую герметическую оболочку (рис. 10.13).

Переход к интегральным схемам позволяет комплексно решить ряд важнейших проблем: наряду с микроминиатюризацией, повышением экономичности и автоматизацией производства значительно повышаются эксплуатационные характеристики аппаратуры.

В качестве примера зависимости объема изделия от технологии его изготовления можно привести следующие цифры: в изделиях широкого потребления с обычными вакуумными приборами в 100 см³ объема содержится одна деталь; при замене ламп полупроводниковыми элементами одна деталь уже приходится всего лишь на 1 см³ объема; применение микромодульного монтажа позволяет разместить в 1 см³ 10—20 деталей. Плотность монтажа в интегральных схемах составляет 300—1000 деталей в 1 см³.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Новый этап в развитии автоматике связан с внедрением вычислительных машин [33; 91].

Первые механические машины были предложены еще в XVII в. Паскалем и Лейбницем, а в 20-х годах XIX в. во Франции счетные машины стали изготавливать на фабрике. Значительную роль в совершенствовании счетных вычислительных машин сыграли работы, выполненные в России академиком П. Л. Чебышевым и инженером В. Т. Однером. В конце XIX в. начали выпускаться различные конструкции арифмометров.

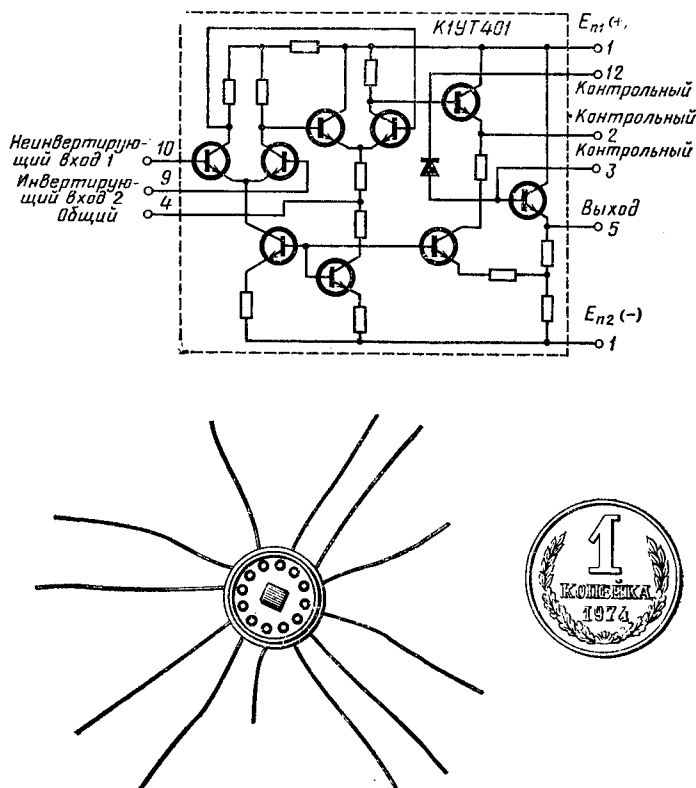


Рис. 10.13. Серийный линейный операционный усилитель К19Т401, выполненный в виде интегральной микросхемы (без верхней части корпуса); сверху схема усилителя, содержащая 9 транзисторов, 1 диод и 12 резисторов

До середины 30-х годов разрабатывались разнообразные конструкции настольных механических и электромеханических вычислительных машин. В период 1939—1944 гг. были сделаны попытки (например, в США) создания цифровой вычислительной машины на основе электромеханических реле, но такая схема оказалась ненадежной.

Только после того как электромеханические реле были заменены электронными переключателями — триггерами (1945—1946 гг.), оказалось возможным значительно усовершенствовать конструкцию вычислительной машины. С помощью триггеров оказалось удобным вести запись и счет чисел в машине. Если механический переключатель срабатывает приблизительно за $1/2$ с, а электрический — за $1/300$ с, то триггер отмечал импульсы несравненно быстрее — за $1/1\,000\,000$ с; это и обеспечило быстроту счета электронной машины. Первая ЭЦВМ была построена в 1946 г. (США).

В нашей стране работы по созданию электронных вычислительных машин дискретного действия начались в 1946 г. под руководством академика С. А. Лебедева. В 1950—1951 гг. была построена и пущена в производство малая электронная машина, осуществлявшая 50 операций в секунду. В 1951 г. вступила в эксплуатацию большая электронная счетная машина — БЭСМ, быстродействие которой характеризовалось уже 2—3 тыс. операций в секунду. Машина заменяла труд десятков тысяч вычислителей. Структурная схема машины показана на рис. 10.14. Для изготовления электронных реле этой машины потребовалось около 5 тыс. электронных ламп. В последующие годы БЭСМ была усовершенствована, в частности за счет использования в схеме оперативной памяти ферритовых сердечников быстродействие ее возросло до 8—10 тыс. операций в секунду и она получила широкое практическое применение.

С 1956 г. началось серийное производство малых универсальных электронных машин «Урал», а с 1958 г. — машины М-20, одной из лучших среди машин мира. Вскоре были выпущены еще более усовершенствованные машины, которые широко использовались в научно-исследовательских институтах, конструкторских бюро и на промышленных предприятиях.

Уже в 50-х годах началось применение электронных вычислительных машин (ЭВМ) для автоматического управления агрегатами и поточными линиями, а также кораблями и самолетами. Успехи в области электроники, в особенности заметный прогресс и совершенствование полупроводниковой техники позволили значительно улучшить конструкции ЭВМ. Первые конструкции вычислительных машин, включавшие сотни и тысячи электронных ламп, были очень громоздкими и потребляли большое количество энергии. Одна из таких «ламповых» машин ЭНИАК (США) содержала 18 тыс. электровакуумных приборов, для охлаждения которых использовалась установка весом в десятки тонн. Машина размещалась в зале площадью до 200 м² и потребляла мощность около 200 кВт. Применение полупроводниковых элементов уменьшило «мозг» машины в сотни раз. Тысяча полупроводниковых триодов умещалась в объеме небольшой коробки.

В 1958 г. в США была построена первая вычислительная машина на полупроводниках. Значительный вклад в создание ЭВМ на по-

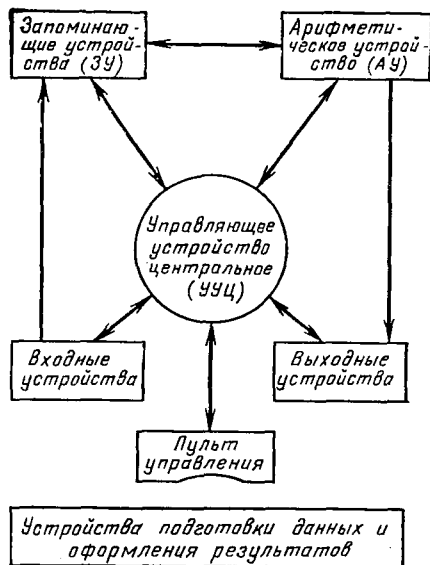


Рис. 10.14. Структурная схема ЭВМ

лупроводниковых приборах, а затем на основе интегральных схем внесли советские ученые и инженеры. Широкое применение получили быстродействующие ЭВМ моделей «Минск», БЭСМ, «Урал», «Мир» и др.

Для координации и централизации информационно-вычислительных операций стали создаваться специальные вычислительные центры.

В 1969 г. странами — членами СЭВ началась разработка семейства программно-совместимых ЭВМ на интегральных схемах, получившего наименование «Единая система электронных вычислительных машин» (ЕС ЭВМ). Модели машин ЕС ЭВМ, выпускаемые отечественной промышленностью, играют важнейшую роль в развитии и внедрении автоматизированных систем управления в различных отраслях народного хозяйства страны.

В настоящее время в СССР и социалистических странах успешно осуществляется программа дальнейшего совершенствования моделей машин ЕС ЭВМ.

Технический прогресс в области электронных вычислительных машин принято характеризовать поколениями машин. В основе различия поколений лежит их элементная база. В соответствии с этим ориентировочно по годам поколения ЭВМ можно представить в следующем виде.

Пятидесятые годы — первое поколение ЭВМ; они строились на электронных лампах и имели сравнительно небольшой объем оперативной памяти.

1960—65 гг. — время машин второго поколения, элементной базой которых служили полупроводниковые приборы — транзисторы и диоды. Как уже отмечалось, применение полупроводников уменьшило габариты и потребление энергии ЭВМ, значительно возрос объем и скорость работы оперативных запоминающих устройств (ОЗУ), повысилась надежность основных элементов машин.

С 1965—67 гг. начали выпускаться ЭВМ третьего поколения, строящиеся на базе интегральных схем; эти машины принято называть современными. И хотя в настоящее время уже начинается переход к машинам четвертого поколения, ЭВМ третьего поколения в ближайшем будущем будет принадлежать ведущая роль.

Переход к микроэлектронике позволил значительно уменьшить габариты и повысить быстродействие и объем памяти ЭВМ. Производительность современных ЭВМ достигает нескольких миллионов операций в секунду, что примерно на три порядка превышает быстродействие машин первого поколения.

Применение микроэлектроники дает еще одно важное преимущество: внедрение автоматизации проектирования и изготовления интегральных схем существенно снижает стоимость всего оборудования ЭВМ. Значительным шагом на пути к микроминиатюризации ЭВМ явилась разработка больших интегральных схем (БИС) или схем большой интеграции. Советскими учеными предложены оригинальные методы автоматизации проектирования и изготовления современных ЭВМ с помощью специальных ЭВМ.

Важнейшими преимуществами машин третьего поколения являются возможность оперирования с произвольной буквенно-цифровой информацией и способность одновременного выполнения многих операций (одновременно в машине находится 16—32 программы). Такая параллельная работа устройств дает большой эффект при построении автоматизированных систем. Машины третьего поколения позволяют осуществлять «разделение времени»: одновременно многие люди могут поддерживать контакт с машиной по различным линиям связи — с помощью пультов, находящихся как вблизи, так и в другом городе или стране.

В ЭВМ третьего поколения получают развитие такие новые элементы, как автоматы, читающие печатный текст, и экранные пульты (дисплеи). На экранный пульт, подобный телевизионному, может выводиться как буквенно-цифровая, так и графическая информация. С помощью особого светового карандаша оператор может непосредственно на экране исправлять текст, рисунок или чертеж. Экранный пульт позволяет осуществлять своеобразный режим диалога между человеком и машиной, т. е. в зависимости от промежуточных результатов изменять программу, давая машине новые инструкции.

Лучшие современные вычислительные машины способны выполнять несколько десятков миллионов операций в секунду, а емкость их оперативной памяти составляет 16 млн. единиц информации.

Конструктивной основой ЭВМ четвертого поколения станут схемы большой интеграции (БИС). Предполагается, что быстродействие этих ЭВМ будет измеряться сотнями миллионов и даже миллиардами операций в секунду, а объем оперативной памяти превысит миллиард единиц информации [91].

Все более расширяется область применения ЭВМ. Если машины первого поколения использовались в основном для научных и частично для экономических расчетов, то ЭВМ второго поколения в дополнение к этому нашли широкое применение для управления технологическими производственными процессами. А машины третьего поколения, кроме того, применяются для автоматизации процессов проектирования, построения автоматизированных систем управления технологическими процессами и промышленными объектами. Создаются объединенные системы машин, управляющие и технологией, и экономикой предприятий.

В Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 гг. указывалось: «Освоить серийный выпуск высокопроизводительных средств вычислительной техники, малых вычислительных машин, а также средств передачи информации. Осуществлять серийный выпуск электронно-вычислительных машин в комплекте со всеми обеспечивающими устройствами ввода и вывода информации и набором типовых программ.

...Увеличить выпуск средств вычислительной техники в 2,4 раза.
...Освоить серийное производство нового комплекса электронных вычислительных машин на базе интегральных схем» *.

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Одной из особенностей современной научно-технической революции является переход от автоматизации процессов непосредственной производственной деятельности человека к автоматизации процессов управления производством, от управления отдельными агрегатами до производственных отраслей и больших систем.

На рис. 10.15 изображена схема комплексной автоматизации тепловой электростанции: автоматизированы топливоподача, процессы водоподготовки, горения, подачи воды в котлы, регулирования температуры, управления котло-турбинными агрегатами.

Этот гигантский прогресс в автоматизации управления является исторически обусловленным, с одной стороны, техническими и экономическими потребностями бурно развивающегося производства, с другой — успехами науки и техники, в первую очередь электроники и вычислительной техники.

Многочисленные факты убедительно показывают эффективность применения автоматизированных систем управления — уменьшаются себестоимость продукции, отходы производства, повышаются производительность и качество продукции, улучшаются условия труда. При этом, естественно, возрастают капиталовложения, возникает необходимость создания и внедрения новых технических средств, подготовки более квалифицированных кадров. Но, как показывают исследования, в подавляющем большинстве затраты на внедрение автоматизированного управления окупаются в пределах 2—4 лет.

Сложность разработки эффективных и экономичных автоматизированных систем управления усугубляется и тем, что рост объемов самого производства и повышение его технико-экономических показателей вызывают еще более интенсивное увеличение объема информации в данной системе. Так, например, повышение к. п. д. энергоблока на 1% сопровождалось увеличением объемов информации почти на 20%.

Поэтому развитие автоматизированных систем управления вызвало необходимость разработки принципиально новых методов сбора и обработки информации, создания специальных контрольно-измерительных и управляющих средств. Например, групповые аналого-цифровые электронные преобразователи способны в течение одной миллисекунды преобразовать в форму кодовых сигналов десятки значений контролируемой величины.

Использование разнообразных вычислительных устройств позволило создать мощные вычислительные комплексы, решающие в

* Материалы XXIV съезда КПСС. Политиздат, 1971 г., стр. 243, 256.

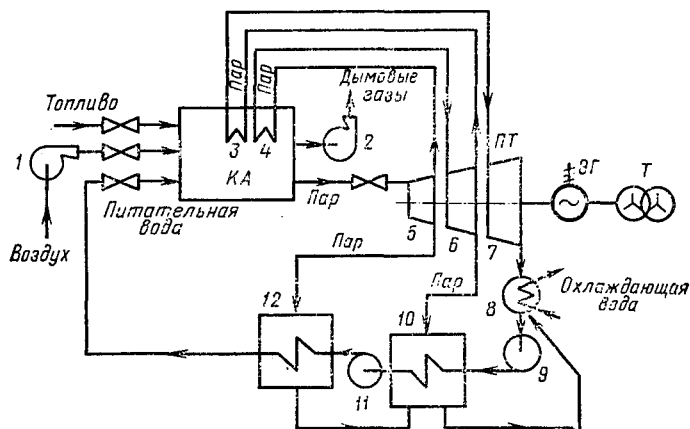


Рис. 10.16. Принципиальная схема современного мощного энергоблока:

1 — вентилятор; 2 — дымосос; 3, 4 — вторичные пароперегреватели; 5—7 — ступени высокого, среднего и низкого давлений паровой турбины; 8 — конденсатор; 9 — конденсатный насос; 10 и 12 — поверхностные теплообменники регенеративного подогрева питательной воды; 11 — питательный насос

несколько секунд самые сложные математические и логические задачи.

В 60-х годах в нашей стране вступили в строй современные автоматизированные системы управления производством (АСУ). Кратко остановимся на системах управления мощными энергоблоками на электростанциях [85].

Современные энергоблоки — это гигантские сооружения, включающие десятки и сотни механизмов (рис. 10.16), действие которых протекает при экстремальных режимах и малых запасах устойчивости.

Для поддержания функционирования блока требуется контролировать до 1000 переменных величин, в том числе около 100 должны быть автоматически строго стабилизированными: число оборотов вала турбины, давление и температура пара перед турбиной, давление в конденсаторе турбины и др. Для управления блоком служат несколько сот регулирующих органов. Сложность управления энергоблоком усугубляется малой инерционностью процессов, суточной неравномерностью графиков нагрузки, жесткими ограничениями допустимых нарушений режимов, тяжелыми формами аварий.

Очень строго должна выдерживаться программа режимов пуска и остановки энергоблока, содержащая сотни операций, следующих друг за другом на протяжении нескольких часов. Поэтому особую роль приобретает автоматическая оптимизация этих режимов.

Возникает необходимость не только в получении более разнообразной по объему информации, но и в увеличении требований и скорости ее переработки.

Как уже отмечалось, автоматизация управления мощными энергоблоками была невозможна без качественного скачка в области технических средств автоматизации и создания принципиально новых методов сбора и обработки информации. Так, например, длина щитов управления, содержащих около 250 приборов (даже при применении малогабаритных образцов), составляет (для блока 200 МВт) 25 м, а пульт управления имеет длину 7 м и содержит около 600 ключей и других аппаратов. Даже опытный оператор не в состоянии контролировать показания всех этих приборов.

Создание мощных современных ЭВМ сделало возможным построение и использование пространственно-временной математической модели объекта, которая в любой момент времени выдает необходимые сведения о режиме работы всех узлов энергоблока и эффективности принимаемых мер по управлению ими. Изыскание наиболее оптимального режима может осуществляться на модели без фактического изменения нагрузки блока.

В последнее десятилетие были разработаны еще более совершенные системы управления, получившие название адаптивных. Адаптивные системы автоматического управления (АСАУ) обеспечивают управление объектами или сложными технологическими процессами, свойства которых могут изменяться непредвиденным образом. Наибольшее применение (в энергетике, металлургии) получили самонастраивающиеся адаптивные системы, в которых, кроме обычного управляющего устройства (УУ), имеется блок определения характеристик и настройки (БОХН) рис. 10.17).

В настоящее время отечественными заводами начат промышленный выпуск аппаратуры для АСУ энергоблоками мощностью 300—800 МВт с условным названием «Комплекс АСВТ» (Агрегатированные средства вычислительной техники большой мощности). АСУ «Комплекс» уже находятся в опытно-промышленной или промышленной эксплуатации на блоках 200, 300, 500 и 800 МВт. Функциональная схема АСУ «Комплекс АСВТ» изображена на рис. 10.18.

Комплекс АСВТ обеспечивает управление энергоблоками 300—800 МВт и электростанций в целом. АСВТ включает вычислительный комплекс и устройства ввода-вывода информации. Центральная часть электронного вычислительного комплекса — процессор — обеспечивает автоматическое выполнение вычислений в последовательности, задаваемой программой. Комплексы АСВТ в сочетании с разнообразными телемеханическими устройствами могут об-

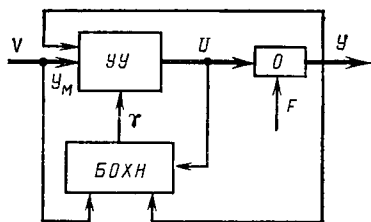


Рис. 10.17. Структурная схема самонастраивающейся адаптивной системы:

V — контролируемые возмущения, y — выходные переменные объекта O ; U — управляющие воздействия на объект; F — неконтролируемые возмущения, действующие на объект; r — настроенные воздействия

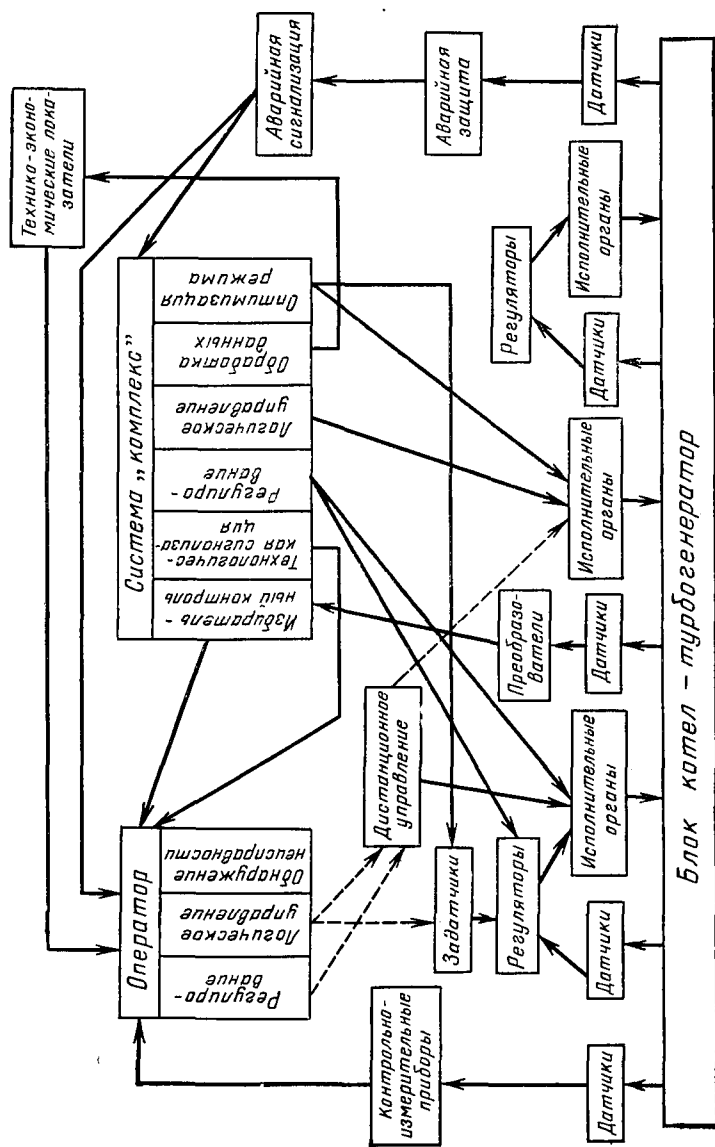


Рис. 10.18 Функциональная схема АСУ «Комплекс АСВТ»

разовывать аппаратный комплекс телеавтоматических систем управления.

В 1972 г. началось серийное производство набора агрегатных модулей АСВТ на микроэлектронной базе.

Следует подчеркнуть, что по мере развития АСУ роль человека все более возрастает, он становится важнейшим «командным звеном», инициатором многих творческих решений, недоступных современным машинам.

Теоретической основой автоматизации технологических процессов является кибернетика — наука об общих закономерностях процессов управления и передачи информации.

Термин «кибернетика» (от греческого слова «кибернетес» — рулевой) встречается еще у Ампера, разрабатывавшего систему классификации наук.

Основоположником кибернетики принято считать американского ученого Н. Винера, книга которого «Кибернетика или управление и связь в машинах и живых организмах» была издана в 1948 г. В нашей стране кибернетика начала интенсивно развиваться после образования в 1959 г. Научного Совета по кибернетике в Академии наук СССР.

В Программе КПСС подчеркивается важная роль кибернетики в коммунистическом строительстве: «Получат широкое применение кибернетика, электронные счетно-решающие и управляющие устройства в производственных процессах промышленности, строительной индустрии и транспорта, в научных исследованиях, в плановых и проектно-конструкторских расчетах, в сфере учета и управления» *.

Возникновение кибернетики было обусловлено, с одной стороны, требованиями производства, все более расширяющимся применением сложных устройств автоматического управления, с другой — возможностями удовлетворения этих требований — развитием научных исследований в области процессов управления. К ним относятся, в частности, разработка теории автоматического регулирования, теории электронных программно-управляемых вычислительных машин, успехи биологических наук, изучающих процессы управления в живой природе.

Среди новых научных направлений, вызванных к жизни научно-технической революцией, можно назвать техническую кибернетику — науку об управлении техническими объектами или системами. Работы советских ученых по многим направлениям кибернетики находятся на мировом уровне. Это, в частности, относится к технической кибернетике (проблемы синтеза управляющих систем и разработка линейных систем управления) и к энергетике (разработка теории управления энергетическими системами). В последние годы в нашей стране получило значительное развитие новое

* Программа Коммунистической партии Советского Союза. Политиздат, 1974, стр. 71.

научное направление — теория планирования эксперимента (с 1960 г.).

В главе 8 были рассмотрены крупнейшие энергосистемы нашей страны, а также объединенная энергосистема «Мир». Все элементы таких крупных энергосистем тесно связаны между собой, взаимно влияют друг на друга. Поэтому каждая подобная система в целом обладает новыми качествами, не свойственными отдельным ее элементам.

В специальных работах, посвященных кибернетизации энергосистем [77, 81—83], показано, что энергосистема имеет общие признаки, свойственные другим кибернетическим системам: наличие цели управления; взаимодействие элементов системы с внешней средой; необходимость отыскания оптимальных условий действия системы; управление процессами на основе сбора, передачи, приема и обработки информации; регулирование процессов на основе принципов обратной связи.

По мере развития процессов автоматизации, когда энергосистемы превращаются в автоматически регулируемые системы, кибернетический подход к анализу всех вопросов, связанных с оптимизацией режимов работы и управления энергосистемами, является совершенно необходимым.

Очевидно, что главным при решении всех проблем, начиная от проектирования электростанций до оптимизации ее эксплуатационных режимов, является обеспечение бесперебойного и экономичного электроснабжения.

Поэтому уже при проектировании электростанции необходимо учитывать и перспективы использования энергоресурсов, и размещение населения, и влияние электростанции, а также промышленных предприятий, использующих ее энергию, на чистоту воздуха, и возможность изменения климата.

Исключительно важное экономическое значение имеет рациональное размещение различных электростанций — тепловых, гидравлических, атомных и распределение нагрузки между ними.

По подсчетам специалистов, научный подход к указанным проблемам, их благоприятное разрешение дает такой экономический эффект, который соизмерим с эффектом, полученным от сооружений в системе дополнительных энергоустановок.

В будущем, по мере развития методов передачи и распределения электроэнергии и разработкой новых источников электроэнергии (например, МГД-генераторов), кибернетический подход к энергосистеме будет еще более необходим.

Для решения этих сложных проблем наиболее благоприятные условия созданы в нашей стране и странах СЭВ, где воплощен в жизнь синтез самой совершенной техники управления и социальных условий, где нет разногласий между производителями и потребителями электроэнергии.

В связи с этим можно привести пример нашумевшей «аварии века», происшедшей в США в ноябре 1965 г. Из-за незначительных неполадок в сети и неправильного распределения резервирования

энергии вышла из строя энергосистема «Канада — США, восточная» мощностью 48 млн. кВт. В результате этого огромный густонаселенный район площадью 200 тыс. кв. км и один из крупнейших в мире городов — Нью-Йорк — в течение 14 ч оставались без электроэнергии. Прекратилась работа промышленных предприятий и учреждений, остановились транспорт, лифты, вентиляторы; 30 млн. человек лишились привычных удобств, возникли аварии, человеческие жертвы. Материальный ущерб составил около миллиарда долларов. Главной причиной аварии были не только технические, но и социальные факторы: отсутствие единой системы управления энергосистемой (она находилась в распоряжении более чем 30 частных американских компаний), пренебрежение необходимостью учета свойств ее как сложной системы.

Кибернетическое управление энергосистемами возможно осуществить только на основе применения современной вычислительной техники. Использование электронных вычислительных машин в энергетике с каждым годом все более расширяется, так как это позволяет высокоэффективно решать разнообразные научно-технические, экономические, информационно-логические, контрольно-управляющие задачи.

В соответствии с требованиями практики были успешно разрешены многие математические задачи, связанные с анализом режимов автоматизированных энергосистем.

ЭВМ используются для анализа режимов электрических систем, в том числе оперативного управления энергосистемами, расчетов устойчивости систем, управления отдельными электростанциями.

Кибернетический подход к электроэнергетическим системам приобретает особую актуальность в связи с ростом энергосистем и объединением их между собой и в особенности в связи с формированием Единой Энергетической Системы СССР.

Уже в последние годы разработан принцип создания кибернетически управляемых линий электропередач переменного тока. Большие перспективы открываются в связи с успешными результатами экспериментов с гибридными цифро-аналого-физическими комплексами (ЦАФК), объединяющими электродинамическую модель и цифроаналоговые устройства. Основополагающие исследования в области электродинамического моделирования и кибернетики энергосистем принадлежат лауреату Ленинской премии проф. В. А. Венникову.

В будущем по мере развития кибернетизации энергосистемы станут самооптимизирующимися системами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. СОВРЕМЕННАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕВОЛЮЦИЯ И РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Современная научно-техническая революция, начавшаяся в середине XX в., представляет собой совокупность коренных качественных изменений в средствах, технологии, организации и управлении производством на основе новых научных принципов. Эта революция подготовлена не только развитием науки и производительных сил, но и теми социальными изменениями, которые произошли в обществе в результате мирового революционного процесса [67, 68, 70—73, 78, 86, 90, 95, 27].

В отличие от промышленного переворота XVIII в., ознаменовавшего переход от мануфактурного к крупному машинному производству, современная научно-техническая революция — это переход к качественно новой высшей ступени машинного производства — к крупному автоматизированному машинному производству, в котором все процессы будут осуществляться автоматической системой машин.

В отличие от системы машин XIX в., состоявшей из трех элементов: машины-орудия, машины-двигателя и передаточного механизма (см. гл. I), современная автоматическая система машин включает помимо указанных трех звеньев еще качественно новое — управляющее звено. В последние два десятилетия на основе управляющего звена была создана принципиально новая машина — управляющая, которая постепенно превращается в самостоятельный тип системы машин. Переход к четырехзвенной структуре машин, содержащих автоматическое устройство, моделирующее некоторые мыслительно-логические функции человека, является исходным пунктом современной научно-технической революции.

Современный этап научно-технической революции характеризуется перестройкой технической и отраслевой структуры народного хозяйства.

В процессе этой перестройки создаются материально-вещественные предпосылки для последующего этапа — крупного автоматизированного машинного производства. Перестройка происходит во всех элементах материального производства — в системе машин, в технологии производства, в структуре всего народного хозяйства.

Важнейшая особенность научно-технической революции заключается в неизмеримо возросшей роли науки в развитии производства, превращении ее в непосредственную производительную силу:

наука становится составным специфическим элементом производительных сил общества.

С точки зрения системного подхода современная научно-техническая революция — это комплекс диалектически взаимосвязанных изменений в системе «наука — техника — производство».

Основой современной научно-технической революции является электрификация всех звеньев производственного процесса. Следовательно, важнейшие изменения в развитии производства, вызванные научно-технической революцией, непосредственно связаны с развитием энергетической техники. Построение материально-технической базы коммунизма немыслимо без увеличения выработки электроэнергии. Создание крупного автоматизированного машинного производства, сложных автоматизированных систем управления, внедрение электронных вычислительных машин на производстве, транспорте, строительстве, в научно-исследовательских, конструкторских, плановых организациях невозможно осуществить без огромных затрат электроэнергии.

Электроэнергетика, более чем какая-либо другая отрасль народного хозяйства, определяет уровень экономического развития страны. За последние десятилетия темпы роста потребления всех видов энергии заметно увеличиваются. Так, если мировое потребление энергии за 20 лет возросло вдвое, то потребление электроэнергии — в 4 раза. Значительно возрастает удельное потребление энергии — один из показателей уровня технического прогресса. По предварительным прогнозам к 2000 г. в общем спросе на энергию электроэнергии составит около 40% вместо 8—10% в 1972—1973 гг. [83].

Если в соответствии с планом развития народного хозяйства СССР выработка электроэнергии в конце девятой пятилетки возрасла до 1038 млрд. кВт·ч, то к 2000 г. она должна увеличиться в несколько раз.

Для осуществления сплошной электрификации такой огромной страны, как Советский Союз, нужно соорудить еще миллионы километров линий передач и распределительных устройств. Ведь 85% энергоресурсов страны находятся на востоке, а 80% топлива потребляется в европейской части СССР. Для передачи огромных количеств электроэнергии на сверхдальние расстояния будут построены линии передач напряжением 1 000 000 В. Но при более высоких напряжениях воздух уже не будет надежной изолирующей средой и будущие линии электропередач, возможно, будут иметь газовую изоляцию. Весьма перспективным (как это уже отмечалось в главе 8) может быть использование явления сверхпроводимости.

Рассмотрим перспективы развития энергетики до конца нашего столетия [69].

По прогнозам специалистов, развитие электроэнергетики будет основываться на тепловой и атомной энергетике.

Извлекаемые прогнозные ресурсы (т. е. та часть ресурсов, которую экономически возможно использовать) химического топлива на Земле составляют около 3800 млрд. т условного топлива, из них

уголь — около 2900 (свыше 25% от прогнозных запасов), газ — 500 млрд. т (около 80% прогнозных запасов). В 1970 г. мировое потребление всех энергетических ресурсов (основное среди них — химическое топливо) составило около 9 млрд. т условного топлива.

По мнению многих специалистов, потребление химического топлива в конце века по всей вероятности начнет несколько снижаться, что будет компенсироваться ростом потребления ядерного топлива, извлекаемые природные ресурсы которого (в случае использования делящегося ядерного топлива в реакторах на быстрых нейтронах) по их энергетическому эквиваленту существенно превосходят запасы химического топлива.

Специалисты считают, что раньше, чем могут быть исчерпаны имеющиеся ресурсы топлива, будут разработаны методы использования других, значительно превосходящих по масштабу источников энергии.

В настоящее время свыше 80% электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях, использующих химическое топливо, в основном уголь. По мере совершенствования методов добычи угля его экономическая эффективность повышается и становится сопоставимой с эффективностью нефти и газа. Поэтому такие тепловые станции будут еще долгое время иметь определяющее значение в энергетике.

Что касается газообразного и жидкого топлива, то его наиболее целесообразно использовать для ТЭЦ, «пиковых» электростанций и энергетических установок.

Немалая роль в энергетике принадлежит гидроэнергетике. Для покрытия «пиковых» нагрузок эффективно используются ГЭС с регулирующими водохранилищами и гидроаккумулирующие электростанции. Наиболее целесообразным является комплексное развитие гидро- и теплоэнергетики.

Началом нового этапа в развитии атомной энергетики является широкое применение ядерных реакторов на быстрых нейтронах, позволяющих почти в 20 раз полнее использовать ресурсы ядерного топлива. Широкое строительство АЭС на быстрых нейтронах, по мнению специалистов, начнется после 1985 г.

Первоочередными научно-техническими проблемами в области строительства мощных энергосистем являются следующие: целесообразное сочетание строительства большого числа мощных атомных станций и дальних линий электропередачи; расширение границ применения переменного тока для устойчивой передачи электроэнергии на расстояния более 2000 км; создание сверхпроводящих опытных линий электропередачи.

Одним из важнейших перспективных направлений развития энергетики является проблема управляемого термоядерного синтеза.

В настоящее время определилось несколько путей в осуществлении термоядерной реакции: использование лазерного излучения,

микротермоядерных взрывов, высокотемпературной плазмы, удерживаемой магнитным полем. Советскими учеными достигнуты значительные успехи в решении таких задач, как удержание, термоизоляция и нагрев плазмы.

К 1985—1990 гг. можно ожидать появления первых прототипов термоядерных станций, работающих в тритий-дейтериевом цикле (как известно, дейтерий в неограниченном количестве можно добывать из воды). Специалисты полагают, что к концу нашего столетия начнут действовать первые промышленные термоядерные реакторы.

За последние годы достигнуты заметные успехи в реализации МГД-метода преобразования энергии. Уже решаются практически вопросы создания промышленной установки с МГД-генератором мощностью до 1 млн. кВт.

Что касается использования энергии солнца и тепла земных недр для нужд «большой» энергетики, то пока еще не разработаны установки, которые имели бы приемлемые технико-экономические показатели.

Существенное, хотя и не решающее значение в удовлетворении возрастающей потребности в энергии будут иметь многоагрегатные ветровые электростанции, установки, использующие энергию морских приливов, тепла морей и океанов. Все большее развитие получают такие методы преобразования энергии, как термоэмиссионный, термоэлектрический и термохимический.

Бурное развитие энергетики выдвигает ряд проблем, связанных с охраной окружающей среды, прежде всего — атмосферы. Ведется интенсивная разработка методов предотвращения или сокращения выбросов в атмосферу золы, сажи, окислов серы и азота.

В СССР, где 80% населения городов снабжается теплом и горячей водой централизованно, загрязнение атмосферы заметно меньше, чем в других промышленных странах.

С каждым годом возрастает степень загрязнения гидросферы, а также повышения температуры водоемов. В связи с этим необходимо разрешить проблему тепловых сбросов ТЭС и АЭС.

Рост мощности энергосистем, создание крупнейших объединений этих систем, разработка новых методов производства, передачи и распределения электроэнергии все более остро ставят вопрос о кибернетизации энергосистем. Кибернетический подход к развитию энергосистем с учетом сложных взаимосвязей с природой и человеческим обществом является необходимым условием дальнейшего прогресса в энергетике. На рис. 11.1 показана связь энергетики с окружающей средой [81, 82].

В предыдущих главах уже отмечалась роль электрификации в создании материально-технической базы коммунизма. «Электрификация, — указывается в Программе КПСС, — ...играет ведущую роль в развитии всех отраслей народного хозяйства, в осуществлении всего современного технического прогресса» *. А с научно-тех-

* Программа Коммунистической партии Советского Союза. Политиздат, 1974, стр. 69.

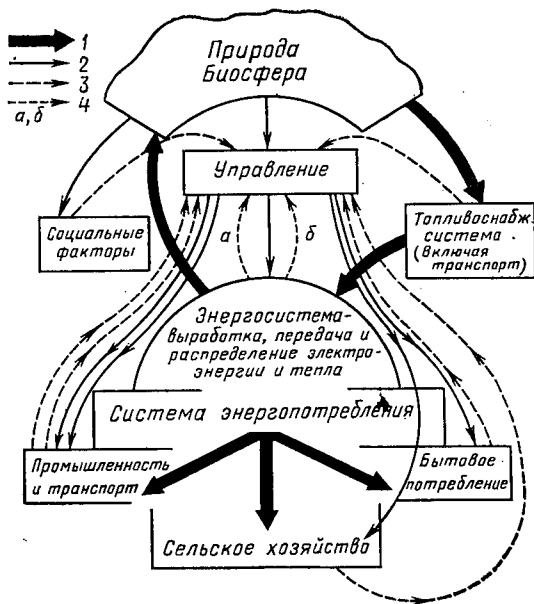


Рис. 11.1. Энергетика и ее связи с окружающей средой:

1 — силовые и топливные связи (потоки энергии);
2 — управление; 3 — информационные связи; 4 — информационные связи о состоянии электростанций и сетей

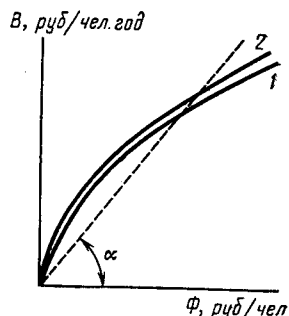


Рис. 11.2. Зависимость производительности труда от фондовооруженности

ническим прогрессом непосредственно связана производительность труда.

Эта связь иллюстрируется (рис. 11.2) диаграммой «Ф — В», позволяющей определить долю прироста производительности труда за счет технического прогресса, а также аналитической зависимостью $V = \sqrt{UF}$ (уравнение параболы), которая с достаточной точностью отражает указанную кривую (1) [70]. Буквами обозначено: В — выработка или национальный доход, деленный на число работающих, т. е. производительность труда; Ф — фондовооруженность, т. е. стоимость производственных фондов, приходящаяся на одного работающего; У — уровень технологии.

Из графика и уравнения следует, что производительность труда при увеличении фондовооруженности работающего, но неизменном уровне технологии стремится к некоторому пределу. Повышение уровня технологии отражается другой, выше лежащей кривой (2). Повышение уровня технологии в два раза обеспечивает прежнюю производительность труда при вдвое меньшей стоимости производственных фондов.

В последние годы производительность труда возрастает за счет технического прогресса приблизительно на 2% в год и за счет повышения фондовооруженности — на 3%. Поэтому сокращение сро-

ков реализации научно-технических идей, например, с 8 до 4 лет даст увеличение производительности труда на 8%, т. е. национальный доход увеличится на десятки миллиардов рублей (эта сумма соответствует примерной стоимости строительства 50 крупных заводов). Резкое повышение эффективности внедрения научно-технических исследований — одна из характерных черт современной научно-технической революции (рис. 11.3) [94].

Основа роста производительности

— электровооружен-

ность труда — за годы Советской власти возросла в 50 раз (см. рис. 11.4). К 1975 г. электровооруженность труда по промышленности в целом возрастет по сравнению с 1970 г. в 1,3 раза и составит приблизительно 25 000 кВт·ч на 1 работающего в народном хозяйстве.

Современная автоматизация производства базируется на электроэнергетической основе.

По сравнению с двигателями внутреннего сгорания значительно возросла роль электродвигателя. Высокие технико-экономические показатели электродвигателя, его способность удовлетворять требованиям автоматизированного производства сделали его одним из важнейших средств труда, способствующих изменению структуры народного хозяйства. Широкое применение индивидуального электропривода обусловило быстро прогрессирующий выпуск электрических двигателей и совершенствование их конструкций.

Изменение структуры народного хозяйства характеризуется повышением роли таких отраслей промышленности, как электро- и энергомашиностроение, радиоэлектроника. Например, в СССР за 1940—1970 гг. производство электродвигателей переменного тока мощностью от 0,25 до 100 кВт увеличилось более чем в два раза, а производство приборов и средств автоматизации — более чем в 3—5 раз по сравнению с ростом производства продукции промышленности в целом. Опережающие темпы выпуска средств автома-

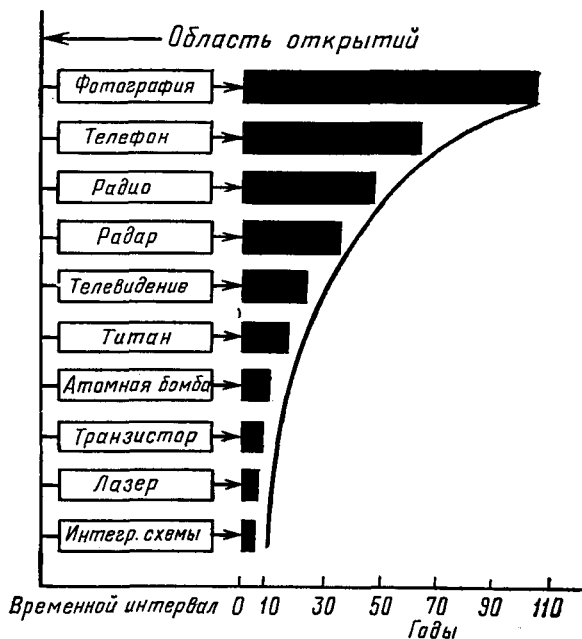


Рис. 11.3. Временной интервал между датой открытия и практическим его использованием

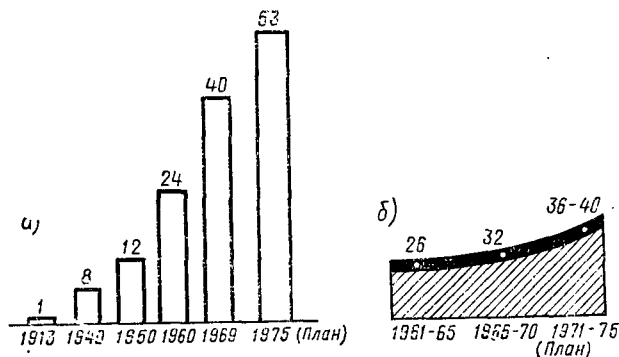


Рис. 11.4. Рост электровооруженности труда в промышленности (а) и производительности труда в промышленности по пятилеткам (б) в процентах

тизации по сравнению с общим ростом объемов производства отражают все более прогрессирующее развитие автоматизации промышленности.

Энергетическая техника лежит в основе автоматизации — одного из основных направлений научно-технической революции. Можно сказать, что важнейшей целью самой научно-технической революции является создание комплексно-автоматизированного производства. Как уже отмечалось, современная автоматизация предусматривает организацию и управление производственными процессами — от отдельных агрегатов до целых отраслей.

В процессе научно-технической революции формируются принципиально новые направления в развитии орудий производства по пути их комплексной автоматизации. Это прежде всего так называемое кибернетическо-бионическое направление, характеризующееся изысканием в живой природе образцов для создания новых технических устройств и методов их построения.

Кибернетика являет пример нового типа взаимодействия наук, она исследует сложные системы разной природы, и на ее основе разработаны общие принципы построения многообразных автоматически действующих машин — информационных, вычислительных, управляющих, моделирующих сложные системы и процессы в них.

Все более развивается качественно новый процесс, также характеризующий научно-техническую революцию, — автоматизация и механизация умственного труда. Наиболее распространенный вид кибернетических машин — электронные вычислительные машины — моделируют в той или иной степени интеллектуальные функции человеческого мозга, тысячекратно увеличивая время обработки различной информации, вычислений и пр.

Государственным планом развития народного хозяйства СССР предусмотрено расширение работ по созданию автоматизированных систем управления предприятиями, производственными объедине-

ниями и территориальными организациями с использованием вычислительной техники. Введены в действие сотни систем, в том числе АСУ технологическими процессами и агрегатами; на вычислительных центрах установлены новые более совершенные ЭВМ третьего поколения — единой системы «Ряд».

Как уже указывалось, создание разнообразных кибернетических машин было бы невозможно без успехов в области изучения электромагнитных явлений, развития электроники, полупроводниковой и электромагнитной техники.

Одной из отличительных особенностей современной научно-технической революции является возрастание роли технологии, создание искусственных материалов, коренные изменения сложившихся процессов воздействия на вещество природы с целью изменения его структуры, состава, формы. И в этом направлении энергетическая техника занимает ведущее положение.

В последние десятилетия электротехнология достигла ранее недостижимых успехов. Как отмечалось в докладах Мировой энергетической конференции (1968 г.), традиционные методы электротехнологии (электролиз, электроплавка, электронагрев и др.), широко применявшиеся для получения и обработки конструкционных материалов до 50-х годов нашего века, оказались недостаточными для создания новых материалов, потребность в которых возникла в результате научно-технической революции. Только на основе последних достижений электрофизики, электротехники и электроники удалось разработать новейшие электротехнологические методы с использованием сильных магнитных и силовых электростатических полей, электроискровых разрядов, быстрых электронов, ионных и электронных лучей, ультразвука, низкотемпературной плазмы. Это позволило получать, эффективно обрабатывать и упрочнять новые конструкционные материалы, способные выдерживать огромные нагрузки в условиях экстремальных скоростей, температур, давлений, механических напряжений.

На основе электротехнических и электронных устройств и установок были созданы эффективные методы преобразования неэлектрических величин в электрические, что позволило решить ряд сложнейших научно-технических проблем. В частности, все последние открытия в области ядерных процессов стали возможными благодаря созданию электрической аппаратуры для измерения неэлектрических параметров, характеризующих ядерные явления. В условиях научно-технической революции электрификация является основой не только технического совершенствования орудий производства и перехода к комплексной автоматизации, но и в значительной степени определяет развитие технологии и совершенствования производственного аппарата.

Важнейшими тенденциями современного технического прогресса становятся унификация и стандартизация, развитие универсализации, блочного построения и агрегатирования разнообразного класса новейших машин и технических устройств. Наиболее наглядно агрегатирование и блочный принцип используются при разработке

конструкций автоматических и вычислительных устройств, они являются основой построения современных технических комплексов для автоматизированных систем управления.

Как уже отмечалось, марксистско-ленинское учение рассматривает научно-технический прогресс в неразрывной диалектической связи с социальными явлениями, со всем ходом развития общества.

Главная особенность современной научно-технической революции — ее связь с грандиозными социальными преобразованиями нашей эпохи, с развитием мировой социалистической системы. Научно-техническая революция вызвала не только коренную перестройку всего технического базиса производства, форм его организации и управления, но и оказала огромное влияние на все стороны социальной жизни общества [67, 68, 73].

Формы и методы осуществления научно-технической революции, ее цели и социальные последствия принципиально различны в социалистическом и капиталистическом обществах.

Невиданные ранее возможности быстрого роста производства находятся в вопиющем противоречии с капиталистическими производственными отношениями, подчиняющими научно-технический прогресс упрочению господства монополий. Современный государственный монополистический капитализм стремится использовать научно-технический прогресс для экономического роста и укрепления военной мощи. Крупнейшим капиталистическим корпорациям удастся с помощью государства использовать достижения науки и техники и добиться определенных успехов.

Ускорение процесса обобществления экономики под влиянием научно-технической революции в наиболее развитых странах видно на примере развития энергетики. Капиталисты вынуждены проводить национализацию и централизацию энергетического хозяйства и даже создавать межнациональные энергетические объединения. Но с каждым годом все сильнее проявляются непреодолимые препятствия на пути последовательного осуществления научно-технической революции. Эти препятствия обусловлены самой природой капиталистического способа производства. В результате не только еще более обостряются противоречия капитализма, но и порождаются новые, вызываемые необычайными возможностями научно-технической революции, которые нельзя использовать в интересах трудящихся. Поэтому резко возрастает безработица, увеличивается интенсификация труда, разоряются мелкие предприниматели.

Попытки буржуазных социологов увековечить капитализм, рассматривать происходящие сдвиги в науке и технике вне общественных отношений опровергаются всем ходом общественно-экономического развития. В недрах современного капитализма вызревают социальные силы, способные низвергнуть отживающий общественный строй. Научно-техническая революция, углубляя противоречия капитализма, усиливает жизненную необходимость коренного переворота в общественных отношениях, расширяет социальную базу мирового революционного процесса.

Только социалистический строй открывает простор для развертывания научно-технической революции в интересах трудящихся. Социалистическая система хозяйства располагает недоступными для капитализма возможностями в развитии производства и в управлении научно-техническим прогрессом.

Научно-техническая революция является главной ареной экономического соревнования между социализмом и капитализмом. Более полное использование преимуществ социализма способствует приближению полного краха системы эксплуатации.

XXIV съезд КПСС указал на необходимость использования преимуществ социализма в осуществлении научно-технической революции. Выработанный съездом курс нашей партии на повышение эффективности народного хозяйства опирается на марксистскую оценку содержания и роли научно-технической революции как главного рычага решения коренных социально-экономических задач развитого социалистического общества. Развитие современной научно-технической революции в СССР — результат целенаправленной и научно-обоснованной политики КПСС [68, 73].

В десятой пятилетке могучий экономический и научно-технический потенциал нашей страны будет максимально использован для ускорения научно-технического прогресса и повышения производительности труда.

К 1980 г. производство электроэнергии составит 1340—1380 млрд. кВт·ч.; на электростанциях страны введутся в действие мощности 67—70 млн. кВт. Будут продолжены работы по формированию Единой энергетической системы страны. Запланировано создание мощных энергоблоков по 500 и 800 тыс. кВт, которые станут базовыми для электростанций на органическом топливе.

В десятой пятилетке будет налажено серийное производство реакторов на тепловых нейтронах и турбоагрегатов к ним единичной мощностью не менее 1 млн. кВт; освоено производство экономических парогазовых установок, мощных газотурбинных энергоустановок и турбогенераторов; комплексов высоковольтного оборудования для линий электропередач постоянного тока напряжением 1500 кВ и переменного тока — до 1150 кВ. Возрастет выпуск приборов и средств автоматизации, а также средств в вычислительной техники. Будет обеспечен выпуск новых видов приборов и радиоэлектронной аппаратуры, в которых широкое применение получают достижения микроэлектроники и лазерной техники*.

Органическое соединение достижений научно-технической революции с преимуществами социалистической системы хозяйства способствует осуществлению важнейших социально-экономических задач: созданию материально-технической базы коммунизма, преобразованию на коммунистических началах всей системы общественных отношений, формированию нового человека.

* Проект ЦК КПСС к XXV съезду Коммунистической партии Советского Союза «Основные направления развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы», «Правда», 14 декабря 1975 г.

Перевод единиц различных систем
в единицы СИ

Величина	Единица	Перевод в единицы СИ
Длина	сантиметр	10^{-2} м
	микрометр	10^{-6}
	фут	0,3 м
	линия	$2,54 \cdot 10^{-3}$ м
	дюйм	$2,54 \cdot 10^{-2}$ м
	морская миля	$1,85 \cdot 10^3$ м
масса	тонна	10^3 кг
	грамм	10^{-3} кг
	фунт	0,454 кг
	унция	$2,835 \cdot 10^{-2}$ кг
плотность	тонна на кубический метр	10^3 кг/м ³
	килограмм на кубический дециметр	10^3 кг/м ³
	фунт на кубический фут	$16,02$ кг/м ³
частота вращения	оборот в секунду	1 с ⁻¹
	оборот в минуту	0,017 с ⁻¹
угловая скорость	оборот в секунду	6,28 рад/с
	оборот в минуту	0,105 рад/с
	градус в секунду	$1,75 \cdot 10^{-2}$ рад/с
сила	дина	10^{-5} Н
	килограмм-сила	9,8 Н
	тонна-сила	$9,8 \cdot 10^3$ Н
	фунт-сила	4,4 Н
давление и напря- жение	бар	10^5 Па
	миллиметр ртутного столба	$1,33 \cdot 10^2$ Па
	дина на квадратный сантиметр	0,1 Па
	килограмм-сила на квадратный сан- тиметр	$9,8 \cdot 10^4$ Па
	фунт-сила на квадратный дюйм	$6,89 \cdot 10^3$ Па
энергия	эрг	10^{-7} Дж
	килограмм-сила-метр	9,8 Дж
	калория	4,19 Дж

Величина	Единица	Перевод в единицы ИС
мощность	килокалория	$4,19 \cdot 10^3$ Дж
	киловатт-час	$3,6 \cdot 10^6$ Дж
	эрг в секунду	10^{-7} Вт
	килограмм-сила-метр в секунду	9,8 Вт
	калория в секунду	4,19 Вт
напряженность поля	лошадиная сила	736 Вт
	вольт на сантиметр ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0	10^2 В/м $3 \cdot 10^4$ В/м
потенциал	ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0	300 В
емкость	сантиметр (ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0)	$1,11 \cdot 10^{-12}$ Ф
	ед. СГСМ и СГС μ_0	10^9 Ф
сила тока	ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0	$3,34 \cdot 10^{-10}$ А
	ед. СГСМ и СГС μ_0	10 А
удельное сопротивление	ом-сантиметр	10^{-2} Ом·м
	ом-квадратный миллиметр на метр	$8,99 \cdot 10^9$ Ом·м
магнитная индукция	гаусс (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0)	10^{-4} Т
магнитный поток	максвелл (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0)	10^{-8} Вб
напряженность магнитного поля	эрстед (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0)	79,6 А/м
магнито-движущая сила	ампер-виток на сантиметр	10^2 А/м
	гильберт (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0)	0,796 А
индуктивность и взаимная индукция	сантиметр (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0)	10^{-9} Г

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. К. Маркс. Капитал. Т. I. Политиздат, 1973.
2. К. Маркс. К критике политической экономии. Политиздат, 1969.
3. Ф. Энгельс. Диалектика природы. Политиздат, 1975.
4. Ф. Энгельс. Анти-Дюринг. Политиздат, 1967.
5. Ф. Энгельс. Происхождение семьи, частной собственности и государства. Политиздат, 1973.
6. К. Маркс и Ф. Энгельс. Манифест коммунистической партии. Политиздат, 1973.
7. В. И. Ленин. Развитие капитализма в России. Полн. собр. соч., т. 3.
8. В. И. Ленин. Материализм и эмпириокритицизм. Полн. собр. соч., т. 18.
9. В. И. Ленин. Империализм, как высшая стадия капитализма. Полн. собр. соч., т. 27.
10. В. И. Ленин. Цивилизованное варварство. Полн. собр. соч., т. 24.
11. В. И. Ленин. Об электрификации. Изд. 2-е, дополненное, Политиздат, 1964.
12. Программа Коммунистической партии Советского Союза. Политиздат, 1974.

Важнейшие труды деятелей науки и техники XVIII—XIX вв.

13. Ампер А. Электродинамика. Изд-во АН СССР, 1954.
14. Доливо-Добровольский М. О. Избранные труды о трехфазном токе. Госэнергоиздат, 1948.
15. Карно С. Размышления о движущей природе огня. Сб. «Второе начало термодинамики». Гостехиздат, 1934.
16. Ленц Э. Х. Избранные труды. Изд-во АН СССР, 1950.
17. Ломоносов М. В. Избранные философские произведения. Госполитиздат, 1950.
18. Майер Р. Закон сохранения и превращения энергии. Гостехиздат, 1933.
19. Петров В. В. Известие о гальвани-вольтовых опытах. Гостехиздат, 1936.
20. Петров В. В. и др. Избранные труды по электричеству. Под ред. Белькинда Л. Д., ГТТЛ, 1956.
21. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Т. I. АН СССР, 1947.

Общая литература по истории энергетической техники

22. План электрификации РСФСР. Политиздат, 1955.
23. К истории плана электрификации Советской страны. Сборник документов и материалов 1918—1920 гг. Политиздат, 1952.
24. 50 лет ленинского плана ГОЭЛРО. Сб. материалов под общей ред. Непорожнего П. С. «Энергия», 1970.
25. История энергетической техники СССР. Т. I и II. Госэнергоиздат, 1957.
26. Пути развития техники в СССР. Под ред. Артоболевского И. И. «Наука», 1967.
27. Современная научно-техническая революция. Историческое исследование, под ред. Шухардина С. В. «Наука», 1970.
28. Кузнецов Б. Г. История энергетической техники. Гостехиздат, 1937.
29. Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я., Шнейберг Я. А. История техники. Госэнергоиздат, 1956.

30. Зворыкин А. А., Осьмова Н. И., Чернышев В. И., Шухардин С. В. История техники. Соцэргиз, 1962.
31. Белькинд Л. Д., Веселовский О. Н., Конфедератов И. Я., Шнейберг Я. А. История энергетической техники. Госэнергоиздат, 1960.
32. Кудрявцев П. С., Конфедератов И. Я. История физики и техники. Учпедгиз, 1960.
33. Очерки развития техники в СССР. Машиностроение. Автоматическое управление. Радиотехника, электроника и электросвязь. Редакционная коллегия под пред. акад. И. И. Артоболевского. «Наука», 1970.
34. Динамомашина в ее историческом развитии. Документы и материалы под ред. В. Ф. Миткевича. Изд-во АН СССР, 1934.
35. Электродвигатель в его историческом развитии. Документы и материалы под ред. В. Ф. Миткевича. Изд-во АН СССР, 1936.
36. Павел Николаевич Яблочков. Труды, документы и материалы. Сост. Л. Д. Белькинд. Изд-во АН СССР, 1954.
37. Белькинд Л. Д., П. Н. Яблочков. Госэнергоиздат, 1950.
38. Белькинд Л. Д. Чарльз Протеус Штейнмец. «Наука», 1965.
39. Белькинд Л. Д. Томас Альва Эдисон. «Наука», 1964.
40. Бернал Д. Ж. Наука в истории общества. ИЛ, 1956.
41. Бочарова М. Д. Электротехнические работы Б. С. Якоби. Госэнергоиздат, 1959.
42. Бочков В. Е. Когда же была изобретена лампочка накаливания. «Электротехника», 1972, № 12.
43. Веселовский О. Н. М. О. Доливо-Добровольский. Госэнергоиздат, 1958.
44. Гусев С. А. Очерки по истории развития электрических машин. Госэнергоиздат, 1955.
45. Гусев С. А. Очерки по истории развития выключателей переменного тока. Госэнергоиздат, 1958.
46. Елисеев А. А. Василий Владимирович Петров. Госэнергоиздат, 1949.
47. Каганов И. Л. Ионные преобразователи. «История энергетической техники СССР», т. 2. Госэнергоиздат, 1957.
48. Каменецкий М. О. Первые русские электростанции. Госэнергоиздат, 1951.
49. Квятковский В. С., Ковалев П. Н. Гидротурбиностроение. Госэнергоиздат, 1958.
50. Конфедератов И. Я. И. И. Ползунов. Госэнергоиздат, 1951.
51. Конфедератов И. Я. История теплоэнергетики. Госэнергоиздат, 1954.
52. Конфедератов И. Я. Джеймс Уатт. «Наука», 1969.
53. Кузнецов Б. В. Развитие тепловых двигателей. Госэнергоиздат, 1953.
54. Матвеев Г. А. История отечественного котлостроения. Машгиз, 1951.
55. Кутателадзе С. С., Цукерман Р. Б. Работы русских ученых в области котельной техники. Госэнергоиздат, 1951.
56. Осадчий Н. П. Исторический очерк развития передачи электрической энергии на расстояние. «Энергия», 1964.
57. Радциг А. А. История теплотехники. Изд-во АН СССР, 1945.
58. Ржонсницкий Б. Н. Никола Тесла. «Молодая гвардия». 1959.
59. Родионов В. М., Черепнев А. И. Естествознание и техника. «Знание», 1974.
60. Темников Ф. Е. Автоматические и телемеханические устройства. «История энергетической техники», т. 2. Госэнергоиздат, 1957.
61. Чеканов А. А., Ржонсницкий Б. Н. Михаил Андреевич Шателен. «Наука», 1972.
62. Храмой А. В. Константин Иванович Константинов. Госэнергоиздат, 1951.
63. Цверева Г. К. Аньош Йедлик. «Наука», 1972.
64. Шателен М. А. Русские электротехники XIX века. Госэнергоиздат, 1955.
65. Шнейберг Я. А. У истоков электротехники. Учпедгиз, 1963.
66. Яроцкий А. В. Павел Львович Шиллинг. Изд-во АН СССР, 1963.

Литература о современной научно-технической революции
и энергетической технике

67. Материалы XXIV съезда КПСС. Политиздат, 1971.
68. КПСС и современная научно-техническая революция. Политиздат Украины. Киев, 1974.
69. Кириллин В. А. Энергетика — проблемы и перспективы. «Коммунист», № 1, 1975.
70. Основные принципы и общие проблемы управления наукой. Отв. ред. Д. М. Гвишиани. «Наука», 1973.
71. Научно-техническая революция и социализм. Под ред. акад. Б. Кедрова. Политиздат, 1973.
72. Научно-технический прогресс и эффективность общественного производства. Отв. ред. М. А. Виленский. «Наука», 1972.
73. Партия и современная научно-техническая революция в СССР. Под ред. И. Н. Артоболевского, А. Д. Педосова, С. В. Шухардина. Политиздат, 1974.
74. Энергетика мира. Под ред. Непорожного П. С. «Энергия», 1973.
75. Электрификация СССР. Под общей ред. Непорожного П. С. «Энергия», 1970.
76. Энергетика СССР в 1971—1975 годах. Под ред. Павленко А. С. и Некрасова А. М. «Энергия», 1972.
77. Кибернетику на службу коммунизму. Сб. статей под ред. Берга А. И. и Венникова В. А., т. 1 и 7. «Энергия», 1961, 1973.
78. Афанасьев В. Г. Научно-техническая революция, управление, образование. Политиздат, 1972.
79. Васильев А. А. Электрическая часть станций и подстанций, ч. 1. Госэнергоиздат, 1963.
80. Электрическая часть станций и подстанций, ч. 2. Под ред. Васильева А. А. «Энергия», 1969.
81. Электрические системы. Под ред. Венникова В. А., т. 1—5, «Высшая школа», 1970—1974.
82. Венников В. А. О задачах научно-технических разработок, связанных с проблемой АСУ ЕЭЭС СССР. «Известия АН СССР. Энергетика и транспорт», 1972, № 2.
83. Венников В. А. Энергетика как большая система. Известия высших учебных заведений. «Энергетика», 1972, № 11.
84. Вольдек А. И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. «Энергия», 1970.
85. Дудников Е. Г., Левин А. А. Промышленные автоматизированные системы управления. «Энергия», 1973.
86. Камаев В. Д. Современная научно-техническая революция. «Мысль», 1972.
87. Каганов И. Л. Промышленная электроника. «Высшая школа», 1968.
88. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины, Ч. 1, 2. «Энергия», 1973.
89. Маргулова Т. Х. Атомные электрические станции. «Высшая школа», 1974.
90. Мелешенко Ю. С. Техника и закономерности ее развития. Лениздат, 1970.
91. Глушков В. М. Введение в АСУ. «Техника», Киев, 1974.
92. Петров Г. Н. Электрические машины, ч. 1. Госэнергоиздат, 1956.
93. Рыжкин В. Я. Тепловые электрические станции. «Энергия», 1967.
94. Уварова Л. И. Научный прогресс и разработка технических средств. «Наука», 1973.
95. Шухардин С. В. История науки и техники, ч. 1. М., МГИАН, 1974.
96. Венников В. А., Новик И. Б. Прометей в XX веке. Заметки о научно-технической революции. «Знание», 1970.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Агрикола Г. 35
 Адамс В. Д. 264
 Александров И. Г. 192
 Ампер А. М. 83, 98, 111, 233, 281
 Араго Ф. Д. 79, 82, 86, 140
 Ари-Бодо Ж. 247
 Арнольд Э. 105
 Архимед 47

 Бардин Д. 269
 Барлоу П. 89
 Бейли У. 140, 141
 Беккерель А. С. 82, 96
 Белькинд Л. Д. 4
 Бенардос Н. Н. 177
 Бен-Эшенбург 155
 Бернал Д. Д. 31
 Бернулли Д. 38
 Бернштейн Э. 26, 128
 Био Ж. Б. 82
 Блати О. Т. 120, 123
 Бо-де-Роша 68
 Болотов А. Т. 77
 Бонч-Бруевич М. А. 263
 Боргман И. И. 158
 Брагин С. М. 209
 Бранли Э. 261
 Бранка Д. 17, 71, 72
 Братейн У. 269
 Бредли Ч. 144, 151
 Броун Ч. Ю. Л. 151 222, 236
 Бушера 243
 Бурбуз С. 94, 95
 Бюрден К. 40
 Быков Н. А. 71

 Вайттрауб 263
 Ван-Депуль 174
 Вантцель 72
 Варбург Э. Г. 105
 Варли К. Ф. 102
 Варли С. О. 102
 Веников В. А. 283
 Винер Н. 281
 Вольдек А. И. 249
 Вольта А. 78, 79
 Вышнеградский И. А. 56, 59

 Галльвакс В. 264
 Гальвани Л. 15, 78
 Гебель Г. 113
 Гейгер Г. 264
 Гейланд 155
 Гельмгольц Г. Л. 30, 31

 Генри Д. 89, 90, 233
 Геншель К. А. 43, 44
 Герике О. 46
 Герон Александрийский 71, 73, 161
 Гефнер-Альтенек Ф. 104
 Герц Г. 124, 261, 264
 Гиббс Э. Д. 121, 122, 137
 Гильберт У. 76, 77
 Гирн Г. А. 58
 Глазунов А. А. 212
 Голяр Л. 121, 122, 129, 137
 Гопкинсон Д. 106, 122, 135
 Гопкинсон Э. 122
 Гсрев А. А. 208
 Гохберг Б. М. 241
 Графтио Г. О. 192
 Грамм З. Т. 96, 103, 104, 114, 118, 119, 126, 146, 172
 Гудыр Ч. 117
 Грондаль Л. 268
 Гюйгенс Х. 49

 Даймлер Г. 69
 Девенпорт Т. 92, 93
 Дей Р. Е. 264
 Декарт Р. 28
 Демокрит 28
 Депре М. 126, 127, 128, 129, 197
 Дери М. 120, 123
 Джоуль Д. П. 30, 31, 82, 125
 Дивиш П. 77
 Дизель Р. 59, 69, 70, 71
 Доливо-Добровольский М. О. 136, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 158, 171, 203, 208, 217, 233, 235, 243
 Дэви Х. 30, 80, 81, 83

 Жданов П. С. 208
 Жонваль Н. Ж. 43, 44

 Зеебек Т. И. 30, 82
 Зинстеден В. И. 97, 101

 Иоффе А. Ф. 268
 Ильченко В. И. 237
 Йедлик А. 102

 Камерлинг-Оннес Г. 213
 Каплан В. 164, 165
 Капп Г. 155, 207
 Кардан Д. 47
 Карлейль А. 80
 Карно Н. С. 29, 31, 69, 75
 Квятковский В. С. 166

Кессельринг Ф. 237
Кертис Ч. Г. 164
Кирхгоф Г. Р. 84
Классон Р. Э. 159, 168
де Ко С. 47
Константинов К. И. 108, 109
Конфедератов И. Я. 4
Коули 49, 50, 54
Красилов А. В. 269
Круг К. А. 155
Кузьминский П. Д. 75
Кулон Ш. О. 77, 78, 83
Кюньо Ж. Н. 50, 51, 64

Лаваль Г. П. 161, 162
Лавуазье А. Л. 28
Ланген Е. 67, 68
Лаплас П. С. 82
Лачинов Д. А. 126, 127, 129
Лебедев П. Н. 124
Лебедев С. А. 208, 273
Лейбниц Г. В. 28, 49, 271
Ленин В. И. 3, 11, 18, 19, 20, 27, 216
Ленуар Ж. Ж. Э. 67, 68
Ленц Э. Х. 31, 82, 87, 88, 99, 105, 111, 125, 154
Леонардо да Винчи 47
Либкнехт В. 27
Литвинов С. В. 61, 62
Лодж О. 261
Лодыгин А. Н. 116
Ломоносов М. В. 28, 29, 30, 77
Лосев О. В. 263

Мадоян С. 269
Майер Р. Ю. 30, 31
Максим Х. 105
Максвелл Д. К. 105, 124, 154, 261
Маркони Г. 262
Маркс К. 6, 7, 14, 15, 18, 19, 21, 26, 37, 46, 128, 190
Мейснер А. 263
Миллер О. фон 151
Морзе С. Ф. Б. 107
Миткевич В. Ф. 207

Никольсон У. 80
Нолле 99
Ньюкомен Т. 49, 50, 54, 55, 56, 60, 181
Ньютон И. 28
Несмит Д. 57, 60

Ом Г. С. 84
Отто Н. А. 67, 68
Однер В. Т. 271

Папалекси Н. Д. 263
Паскаль Б. 271
Папен Д. 49, 68
Парк 208

Парсонс Ч. А. 162, 163, 236
Патон Е. О. 255
Пачинотти А. 95, 96, 103, 104
Пельтон А. Л. 44, 45, 164
Пельтье Ж. Ш. А. 30, 82
Пермяков А. И. 43
Петров В. В. 30, 80, 81, 83
Пик 207
Пиксин 98
Пироцкий Ф. А. 126, 173, 174
Планте Г. Р. 97
Поггендорф И. Х. 111
Пойнтинг Д. Г. 124
Ползунов И. И. 51, 52, 53, 55, 56, 60, 64, 181, 256
Понселе Ж. В. 36, 41
Попов А. С. 261, 262
Порта Д. 47

Равдоник В. С. 5
Раймонд Ф. 247
Рамзин Л. К. 161
Рато К. Э. О. 163
Рейс Ф. Ф. 81
Риччи У. 89
Рихман Г. В. 77, 78
Робертсон 208
Рожков В. И. 43
Румкорф Г. Д. 120
Румфорд Б. 29
Руппель 239
Савар Ф. 82
Сафонов И. Е. 41
Сван Д. У. 113
Свинберн Д. 123
Севери Т. 48, 49
Сегнер Я. А. 38, 39
Сен-Венан А. Ж. К. Б. 72
Сименс В. 101, 102, 118, 119, 126, 136, 137, 173, 174, 175, 178

Скотт 158
Славянов Н. Г. 177
Смирнов Н. В. 139
Смитон Д. 57, 60
Сушкин Н. И. 212
Слепая И. 235
Стефенсон Д. 18, 65
Стирлинг 63
Стодола А. 162
Столетов А. Г. 105, 264

Тесла Н. 141, 142, 143, 144, 147, 148, 151, 154, 157
Тиме И. А. 43
Томсон (Кельвин) У. 31
Томсон И. 120, 235
Торричелли Э. 46
Тревитик Р. 64, 65
Тюри Р. 129, 197, 202, 203
Уайльд Г. 101, 102, 118

Уатт Д. 15, 23, 53, 54, 55, 56, 57, 59,
60, 64, 181, 256
Уитстон Ч. 102, 111, 120
Ульянин В. А. 264
Умов Н. А. 124
Усагин И. Ф. 121

Фарадей М. 30, 81, 84, 85, 86, 87, 88,
89, 97, 98, 120, 124
Фарко 59
Феррарис Г. 128, 141, 142, 145, 154
Ферранти С. Ц. 123, 137, 235, 236
Флеминг Д. А. 263
Фонтен И. 125, 128, 129
Форест Ли де 263
Фортескью 155
Франклин Б. 77
Френсис Д. Б. 43
Фролов К. Д. 35, 36
Фроман П. Г. 94
Фультон Р. 66
Фурнейрон Б. 41, 42, 43
Фридкин П. А. 249
Фурье Ж. Б. 75

Хазельвандер Ф. А. 144, 151
Хауд 43
Хиллард 236
Хиорт С. 102
Холмс Ф. Х. 99
Хохштедтер 209
Хьюлетт 207

Цейнер Г. А. 162
Целли Г. 163
Циолковский К. Э. 17
Циперновский К. 123

Чебышев П. Л. 56, 271
Черепанов Е. А. 18, 65
Черепанов М. Е. 18, 65
Чиколев В. Н. 110, 159

Швейггер И. Х. С. 111
Шенфер К. И. 259
Шиллинг П. Л. 106, 107, 108, 117, 257
Шлаттер И. А. 52
Шпаковский А. И. 113
Штейнмец Ч. П. 106, 155, 220, 244
Штерер Э. 99
Штурман Г. И. 249
Шухов В. Г. 63, 135, 160
Шухардин С. В. 5
Щенснович А. Н. 158

Эванс О. 61
Эвершед С. 155
Эдисон Т. А. 105, 117, 131, 135, 138,
209, 210, 237, 262, 263
Эйлер Л. 39, 40
Эльстер Ю. 264
Энгельс Ф. 9, 22, 26, 28, 31, 49, 79,
128
Эпикур 28
Эриксон Д. 73
Эрстед Г. К. 30, 82
Юинг Т. 106
Юнг Т. 31
Юз Д. Э. 107

Яблочков П. Н. 113, 114, 115, 118, 119,
121, 122, 131, 146, 154
Якоби Б. С. 90, 91, 92, 93, 94, 99, 105,
107, 108, 110, 111, 117, 120, 153
Яковлев С. А. 209

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Глава 1. Техника и закономерности ее развития	6
Понятие «техника». Движущие силы и закономерности развития техники	6
Влияние законов природы и общественных экономических законов на развитие техники	9
Орудия и машины как средства увеличения производительности труда	11
Качественные показатели развития техники	13
Роль личности в развитии техники	15
Глава 2. Энергетическая техника и ее роль в развитии общественного производства	21
Энергетическая техника. Исторические условия возникновения и развития энергетической техники	21
Периоды развития энергетики	23
Сущность и значение электрификации народного хозяйства	26
История открытия закона сохранения и превращения энергии	27
Глава 3. Начальный период развития гидроэнергетики	32
Предпосылки возникновения гидроэнергетики. Этапы развития гидравлических двигателей	32
Развитие водяных колес	33
Развитие водяных турбин	38
Глава 4. Развитие теплоэнергетики	46
Предпосылки возникновения теплоэнергетики	46
Начальный период развития теплового двигателя	48
Построение универсального двигателя	50
Промышленный переворот и двигатель Уатта	53
Специализация паросиловых установок и дальнейшее развитие паровых машин	56
Развитие паровых котлов	60
Возникновение парового транспорта	64
Возникновение двигателей внутреннего сгорания	66
Первые опыты по созданию паровых турбин. Газовая турбина	71
Глава 5. Зарождение электротехники	76
Этапы развития электротехники. Становление электротехники	76
Первый генератор электрического тока. Открытие химических, тепловых, световых и магнитных действий тока	78

	<i>Стр.</i>
Электродинамика. Основные законы электрической цепи.	
Электромагнитная индукция	83
Развитие электрических машин постоянного тока	88
Начало практических применений электрической энергии.	
Зарождение электроавтоматики и электроприборостроения	106
Глава 6. Возникновение и развитие электроэнергетики	112
Предпосылки перехода энергетической техники на новый качественный уровень. Роль электрического освещения в становлении электроэнергетики	112
Развитие кабельной и электроизоляционной техники	116
Развитие генераторов и двигателей однофазного перемен- ного тока	117
Развитие однофазных трансформаторов	120
Важнейшие теоретические исследования в области элект- ромагнетизма	124
Первые экспериментальные и теоретические исследования в области передачи электроэнергии постоянным током . .	124
Электростанции постоянного и однофазного переменного тока	130
Возникновение многофазных систем. Двухфазный асин- хронный двигатель	140
Трехфазная система	144
Трехфазный трансформатор	149
Первая трехфазная линия электропередачи	151
Разработка основ теории цепей, машин и трансформато- ров переменного тока	153
Глава 7. Электрификация	156
Первые трехфазные электростанции	156
Развитие первичной энергетики в связи с электрификацией	159
Возникновение районных электростанций	166
Возникновение энергетических систем	168
Зарождение электропривода, электротранспорта и элект- ротехнологии	170
Глава 8. Развитие техники производства и распределение электро- энергии	179
Электрические станции. Развитие тепловых электростан- ций	179
Развитие гидроэлектростанций	190
Развитие электрической части электростанций	195
Развитие техники передачи электрической энергии на боль- шие расстояния	201
Объединенные энергосистемы	214
Развитие системной автоматики	216
Глава 9. Развитие основного электротехнического оборудования, электропривода и электротехнологии	219
Развитие турбогенераторов, гидрогенераторов и трансфор- маторов	219
Развитие отключающих аппаратов высокого напряжения .	232
Развитие автоматизированного электропривода	242
Развитие магистрального электротранспорта и электротех- нологии	252

Глава 10. Развитие автоматики и вычислительной техники. Автоматизированные системы управления производством	256
Общая характеристика развития автоматики и вычислительной техники	256
Развитие электронных и полупроводниковых устройств	261
Электронные вычислительные машины	271
Применение автоматизированных систем управления в энергетике	276
Глава 11. Заключение. Современная научно-техническая революция и развитие энергетической техники	284
Приложение	294
Рекомендуемая литература	296
Именной указатель	299

*Олег Николаевич Веселовский
и Ян Абрамович Шнейберг*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ЕЕ РАЗВИТИЕ

Научный редактор В. А. Терехов. Редактор О. В. Долженко. Художественный редактор Н. К. Гуторов. Переплет художника О. В. Комаева. Технический редактор Э. М. Чижевский. Корректор С. К. Марченко

Т—02827 Сдано в набор 14/VIII—75 г. Подп. к печати 27/I—76 г.
Формат 60×90^{1/16} Бум. тип. № 2 Объем 19 печ. л. Усл. п. л. 19
Уч.-изд. л. 22,05 Изд. № ЭР-172 Тираж 12 000 экз. Цена 1 р. 02 к.

План выпуска литературы издательства
«Высшая школа» (вузы и техникумы) на 1975 г. Позиция №165
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14,

Издательство «Высшая школа»

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
Хохловский пер., 7. Зак. 3831.