

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

И.А. Дубина
Ю.Н. Ротанова
О.В. Буланова
Е.Б. Ягольников

История электроэнергетики

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Магнитогорск
2011

УДК 621.3

Рецензенты:

Заведующий кафедрой электроснабжения промышленных
предприятий Московского энергетического института
(технического университета),
доцент, кандидат технических наук
С.А. Цырук

Начальник лаборатории анализа и управления энергоресурсами
центра энергосберегающих технологий
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»,
доцент, кандидат технических наук
Л.А. Концев

Дубина И.А., Ротанова Ю.Н., Буланова О.В., Ягольников Е.Б.
История электроэнергетики: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во
Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 98 с.

Пособие знакомит с основными этапами развития электротехники и электроэнергетики. Подробно рассмотрены вопросы практического применения электроэнергии на начальных этапах развития теории электромагнетизма.

Пособие предназначено для студентов университета, изучающих дисциплину «История электроэнергетики» и студентов специальности 140211 «Электроснабжение» и направления 140200 «Электроэнергетика».

УДК 621.3

- © Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2011
- © Дубина И.А., Ротанова Ю.Н.,
Буланова О.В., Ягольников Е.Б., 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Тема 1. ЗАРОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	7
1.1. Первые наблюдения электрических и магнитных явлений.....	7
1.2. Начало экспериментальных исследований электричества и магнетизма.	8
1.3. Электростатическая машина.....	9
1.4. Изобретение лейденской банки.	10
1.5. Научное обоснование явлений атмосферного электричества.	11
1.6. О «сходстве и подобии» электрических и магнитных явлений.....	14
Тема 2. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И ЗАКЛАДКА ФУНДАМЕНТА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.	16
2.1. Открытие электрического тока.....	16
2.2. Обнаружение и изучение действий электрического тока.....	18
2.3. Взаимодействие электрического тока и магнита. Разработка основ электродинамики.....	21
2.4. Открытие термоэлектричества.....	24
2.5. Установление законов электрической цепи.	24
Тема 3. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.....	26
3.1. Открытие электромагнитной индукции.	26
3.2 Начальный период развития электрических двигателей и генераторов.....	30
3.3 Развитие электродвигателей.	31
3.4. Развитие электрических генераторов.	36
3.5. Развитие неэнергетических применений электричества.	43
3.6 Становление основ теории электрических цепей и электромагнетизма.....	47
Тема 4. СТАНОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ КАК САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ ТЕХНИКИ.....	50
4.1. Развитие электрического освещения.....	50
4.2. Возникновение потребности в электрических машинах переменного тока	56
4.3. Дальнейшее совершенствование генераторов и двигателей	57
4.4. Развитие трансформаторов	59
4.5. Поиски путей передачи электроэнергии на большие расстояния.	62
4.6. Ранние электростанции	67
4.7. Развитие теории электрических цепей переменного тока.	73
Тема 5. СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ	76
5.1. Открытие явления вращающегося магнитного поля	76
5.2. Трехфазная система токов и напряжений	80
5.3. Первая трехфазная линия электропередачи.	84
5.4. Возникновение районных электростанций и энергетических систем....	86
5.5. Развитие электропривода, электрического транспорта и электротехнологии.	92
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	98

ВВЕДЕНИЕ

Гуманитаризация и гуманизация высшего технического образования приводят к необходимости введения в учебные планы дисциплин, освещающих историю культуры, естествознания и отдельных отраслей науки и техники. Изучение истории развития электроэнергетики будет способствовать воспитанию всесторонне образованной личности, подготовленной к самостоятельной творческой работе и непрерывному самообразованию. Жизнь и деятельность наиболее выдающихся представителей науки и техники могут служить студентам прекрасным примером истинного гуманизма и высоких гражданских нравственных позиций. Только на конкретных примерах зарождения, развития и совершенствования каких-либо технических устройств можно познать диалектику научно-технического прогресса. Опыт поколений показывает, что нужно хорошо знать прошлое, чтобы ориентироваться в настоящем и предвидеть будущее.

Одной из характерных закономерностей развития техники является историческая обусловленность важнейших открытий и изобретений. Практически все выдающиеся изобретения были вызваны объективной необходимостью, вытекающей из потребности в материальных благах. История электроэнергетики показывает, что в XIX–XX вв. крупные вклады в ее развитие делались приблизительно в одно и то же время многими изобретателями и учеными в разных странах и независимо друг от друга.

Электроэнергия занимает особое место среди других видов энергии благодаря своим замечательным свойствам: возможности производства в необходимых количествах, транспортировки с помощью линий электропередач на большие расстояния, дробление на любые доли с минимальными потерями, наличия удобных средств автоматизации и управления процессами ее производства и распределения, возможности легкого преобразования в любой другой вид энергии. Эти объективные свойства электроэнергии позволили в короткий исторический срок не только решать все основные вопросы собственно электроэнергетики, но и модернизировать всю «неэлектрическую технику», перевести ее с помощью электрических средств контроля, управления, обработки информации на качественно новый уровень. Техническая реконструкция народного хозяйства на базе электроэнергетики не могла не вызвать и глубоких социально-экономических преобразований. Таким образом, позволяя широко использовать природные энергоресурсы, наилучшим образом размещать производительные силы, широко механизировать и автоматизировать производство, электроэнергетика непрерывно увеличивает производительность общественного труда, делает его более легким, гигиеничным и менее опасным. Решающая роль в современном научно-техническом прогрессе принадлежит электрификации. Под электрификацией понимается

широкое внедрение электрической энергии в народное хозяйство и быт. Сегодня нет ни одной области техники, где в том или ином виде не использовалась бы электроэнергия. В перспективе ее применение еще более расширится.

В развитии электротехники, электроэнергетики и электрификации условно можно выделить шесть этапов:

1. Становление электростатики (до 1800-го г.). К этому периоду относятся первые наблюдения электрических и магнитных явлений, создание первых электростатических машин и приборов, исследования атмосферного электричества, разработка первых теорий электричества, установления закона Кулона, зарождение электромедицины.

2. Закладка фундамента электротехники и ее научных основ (1800–1830). Начало этого периода ознаменовано созданием «вольтова столба» – первого электрохимического генератора, а вслед за ним большой батареи В.В. Петрова, с помощью которой им была получена электрическая дуга и сделано много других научных открытий. Важнейшими достижениями этого периода является открытие основных свойств электрического тока, законов Ампера, Био и Савара, Ома, создание прообраза электродвигателя, первого индикатора электрического тока (мультипликатора), установление связей между электрическими и магнитными явлениями.

3. Зарождение электротехники (1830–1870). Самым знаменательным событием этого периода явилось открытие Майклом Фарадеем явления электромагнитной индукции, создание первого электромашинного генератора. Разрабатываются разнообразные конструкции электрических машин и приборов, формулируются законы Ома, Кирхгофа, Ленца, создаются первые источники электрического освещения, первые электроавтоматические приборы, зарождается электроизмерительная техника. Однако широкое практическое применение электроэнергии еще не было возможным из-за отсутствия экономичного электрического генератора.

4. Становление электротехники как самостоятельной отрасли техники (1870–1890). Создание первого промышленного электромашинного генератора с самовозбуждением открывает новый этап в развитии электротехники, которая становится самостоятельной отраслью техники. В связи с развитием промышленности, ростом городов возникает острая потребность в электрическом освещении, начинается строительство «домовых» электростанций, вырабатывающих постоянный ток. Электроэнергия становится товаром и все более остро ощущается необходимость централизованного производства и экономичной передачи ее на значительные расстояния. Решить эту проблему на базе постоянного тока было нельзя из-за невозможности трансформации постоянного тока. Значительным стимулом к внедрению переменного тока явилось изобретение «электрической свечи» П.Н. Яблочковым и разработка им схемы дробления элек-

троэнергии посредством индукционных катушек, представлявших собой трансформатор с разомкнутой магнитной системой. Однако однофазные электродвигатели были непригодны для целей промышленного электропривода.

Одновременно разрабатываются способы передачи электроэнергии на большие расстояния посредством значительного повышения напряжения линий электропередач. Дальнейшее развитие электрического освещения способствовало совершенствованию электрических машин и трансформаторов. В середине 80-х гг. XIX в. началось серийное производство однофазных трансформаторов с замкнутой магнитной системой (М. Дери, О. Блати, К. Циперновский). Идея П.Н. Яблочкова о централизованном производстве и распределении электроэнергии претворяется в жизнь, начинается строительство центральных электростанций переменного тока.

Однако развивающееся производство требовало решения сложнейшей научно-технической проблемы: экономичной передачи электроэнергии на дальние расстояния и создания экономичного и надежного электродвигателя, удовлетворяющего требованиям промышленного электропривода. Эта проблема была решена на основе многофазных и, в частности, трехфазных систем.

5. Становление и развитие электрификации (с 1891 г.). Важнейшей предпосылкой разработки трехфазных систем явилось открытие (1888) явления вращающегося магнитного поля. Первые многофазные двигатели были двухфазными, но наиболее рациональной оказалась трехфазная система, поскольку она имела ряд существенных преимуществ как перед однофазными, так и перед другими многофазными системами. В разработку трехфазной системы большой вклад сделали ученые и инженеры разных стран. Но наибольшая заслуга в ее разработке принадлежит М.О. Доливо-Добровольскому, сумевшему придать своим работам практический характер, создавшему трехфазные синхронные генераторы и асинхронные двигатели, трансформаторы. Убедительной иллюстрацией преимуществ трехфазной системы токов и напряжений была знаменитая электропередача Лауфен–Франкфурт на Майне, сооруженная при активном участии Доливо-Добровольского (1891).

С этого момента начинается бурное развитие электрификации и электроэнергетики: строятся мощные электростанции, возрастает напряжение электропередач, разрабатываются новые конструкции электрических машин, аппаратов и приборов. Электрический двигатель занимает господствующее положение в системе промышленного привода. Процесс электрификации постепенно охватывает все новые области производства: развивается электрометаллургия, электротермия, электрохимия. Электроэнергия все более широко начинает использоваться в самых разнообразных отраслях промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и в быту. Широкое применение переменного тока потребовало теоретиче-

ского осмысления и математического описания физических процессов, протекающих в электрических машинах, линиях электропередач, трансформаторах. Расширяются исследования в цепях переменного тока с помощью круговых и векторных диаграмм. Огромную прогрессивную роль в анализе процессов в цепях сыграл комплексный метод, предложенный в 1893–1897 гг. Ч.П. Штейнмецом. С развитием крупных энергосистем и увеличением протяженности электропередач возникла новая серьезная научно-техническая проблема обеспечения устойчивости параллельной работы генераторов электрических станций, которая была успешно решена отечественными и зарубежными учеными. Теоретические основы электротехники становятся базой изучения учебных электротехнических дисциплин в высших учебных заведениях и фундаментом научных исследований.

6. Зарождение и развитие электроники (первая четверть XX века). Рост потребности в постоянном токе (электрохимия, электротранспорт, электропривод и др.) вызвали необходимость развития преобразовательной техники, что привело к зарождению, а затем бурному развитию промышленной электроники. Электротехника становится базой для разработки автоматизированных систем управления (АСУ) энергетическими и производственными процессами. Создание разнообразных электронных и в особенности микрoeлектронных устройств позволяет коренным образом повысить эффективность автоматизации процессов вычислений, обработки информации, осуществлять моделирование сложных физических явлений, решение логических задач и др. при существенном снижении габаритов устройств, повышении их надежности и экономичности.

Значительный прогресс в электронике наметился после создания больших интегральных схем (БИС), быстроедействие которых измеряется миллиардными долями секунды, а минимальные размеры составляют 2–3 мкм. Внедрение БИС привело к созданию микропроцессоров, осуществляющих обработку информации по программе, и микроЭВМ.

Разработка учебного пособия проводилась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (государственный контракт № 02.740.11.0755).

Тема 1. ЗАРОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

1.1. Первые наблюдения электрических и магнитных явлений

Из древних сказаний и летописей, относящихся ко второму тысячелетию до н. э., мы узнаем о многих интересных фактах практического использования магнита. Индейцы использовали его для извлечения железных наконечников стрел из тел раненых воинов. В китайских летописях рассказывается о волшебных магнитных воротах, сквозь которые не мог пройти человек, спрятавший металлическое оружие. При раскопке городища ольмеков (Центральная Америка) найдены скульптуры тысячеклетней давности, высеченные из магнитных глыб. В Китае во втором тыся-

челетии до н. э. уже применялись первые компасы разных конструкций. Европейцы заимствовали компас у арабов, а арабы у китайцев. Естественно, что древние ученые и естествоиспытатели задумывались над природой загадочных свойств магнита. Один из древних мудрецов Фалес (640–550 гг. до н. э.) считал причиной движения «душу», и поэтому, по мнению Аристотеля (384–322 гг. до н. э.), наличие у магнита «души» вызывало притяжение к нему железа. С именем Фалеса связаны и дошедшие до нас предания о свойствах натертого янтаря притягивать легкие тела. По его мнению, в янтаре (как и в магните) имеется «душа», являющаяся первопричиной притяжения. Греки называли янтарь «электрон», от этого (спустя много веков) и произошло слово «электричество».

И еще одно любопытное явление не осталось незамеченным древними народами, жившими на побережье Средиземного моря в бассейне реки Нил. Речь идет об «электрических рыбах» – скате и соме. При соприкосновении с этими рыбами, имеющими электрические органы, человек испытывал сильные удары. Известно, что в I в. н. э. римские врачи использовали электрический скат для лечения подагры, головной боли и других болезней. Безусловно, древние народы наблюдали грозные раскаты грома и яркие вспышки молнии, внушавшие им естественный страх, но ни одному из мудрецов тех времен не могла прийти мысль о том, что и притяжение натертого янтаря, и удары «электрических рыб», и явления грозы в атмосфере имеют одну и ту же природу.

Из многочисленных источников следует, что практически до 1600 г. не было сделано ни одного открытия в области электрических явлений, а в области магнетизма описаны способы использования мореплавателями компаса (арабами в IX веке, а европейцами в XI в.). В XIII в. мы находим подтверждения некоторым новым открытиям, сделанным независимо друг от друга англичанином Р. Бэконом, французом П. Перегрином и итальянцем Д.Б. Порты. Им удалось установить ряд свойств магнита: существование разноименных полюсов и их взаимодействие, распространение магнитного действия через различные тела (бумага, дерево и др.), невозможность получения магнита с одним полюсом. П. Перегрин и Д.Б. Порты описали способы изготовления магнитных стрелок, а П. Перегрин (около 1270 г.) впервые снабдил компас градуированной шкалой.

Вопросы для самоконтроля

1. Где наблюдались первые электрические и магнитные явления?
2. Какие открытия сделали Р. Бэкон и П. Перегрин в XVIII в.?

1.2. Начало экспериментальных исследований электричества и магнетизма

В XVI–XVII вв. с развитием торговли в Европе все большее развитие получает экспериментальный метод научных исследований, одним из основоположников которого по праву называют Леонардо да Винчи (1452–1519). Это в его в записной книжке были найдены знаменательные

слова: «Не слушай учения тех мыслителей, доводы которых не подтверждены опытом». Экспериментальный метод исследований нанес заметный удар по мистицизму и разного рода вымыслам и предрассудкам.

Значительный перелом в представлениях об электрических и магнитных явлениях наступил в самом начале XVII в., когда вышел в свет фундаментальный научный труд видного английского ученого В. Гильберта (1554–1603) «О магните, магнитных телах и большом магните – Земле» (1600). В отличие от многих своих предшественников Гильберт считал, что причиной действия на магнитную стрелку является магнетизм Земли, которая является большим магнитом. Свои выводы он основал на оригинальном эксперименте, впервые им осуществленном.

Он изготовил из магнитного железняка небольшой шар «маленькую Землю – тереллу» и доказал, что магнитная стрелка принимает у поверхности этой «тереллы» такие же положения, какие она принимает в поле земного притяжения. Он установил возможность намагничивания железа посредством земного магнетизма.

Исследуя магнетизм, Гильберт занялся также изучением электрических явлений. Он доказал, что электрическими свойствами обладает не только янтарь, но и многие другие тела – алмаз, сера, смола, горный хрусталь, электризующиеся при их натирании. Эти тела он назвал «электрическими» в соответствии с греческим названием янтаря «электрон».

Фундаментальный труд Гильберта выдержал в течение XVII в. несколько изданий, он был настольной книгой многих естествоиспытателей в разных странах Европы и сыграл огромную роль в развитии учения об электричестве и магнетизме.

Вопросы для самоконтроля

1. В чём заключался вклад Гильберта в экспериментальные исследования электричества?

2. Назовите основоположников научных исследований в Европе в XVII–XVIII вв.?

1.3. Электростатическая машина

Одним из первых, кто, познакомившись с книгой Гильберта, решил получить более сильные проявления электрических сил, был известный изобретатель воздушного насоса магдебургский бургомистр Отто фон Герике (1602–1686). В 1650 г. он изготовил шар из серы, величиной с детскую голову, насадил его на железную ось, закрепленную на деревянном штативе. При помощи ручки шар мог вращаться и натирался ладонями рук или кусками сукна, прижимаемого к шару рукою. Это была первая простейшая электростатическая машина. Герике удалось заметить слабое свечение электризуемого шара в темноте и, что особенно важно, впервые обнаружить, что пушинки, притягиваемые шаром, через некоторое время отталкиваются от него. Это явление ни Герике, ни многие его

современники долго не могли объяснить. Известный ученый Г.В. Лейбниц (1646–1716), пользуясь машиной Герики (март 1672 г.), наблюдал электрическую искру – это первое упоминание о таком загадочном явлении. В течение первой половины XVIII в. электростатическая машина претерпела ряд усовершенствований: шар из серы был заменен стеклянным (т.к. стекло более сильно электризовалось), а позднее вместо шаров или цилиндров (которые труднее было изготовить, при нагревании они не редко взрывались) стали применять стеклянные диски. Для натирания использовались кожаные подушечки, прижимаемые к стеклу пружинками. Важным новым элементом конструкции машины стал кондуктор (1744) – металлическая трубка, подвешенная на шелковых нитях, а позднее устанавливаемая на изолирующих опорах. Кондуктор служил резервуаром для сбора электрических зарядов, полученных трением.

В 60-х гг. XVIII в. электростатическая машина приобрела современные черты. Разнообразные эксперименты с ними и успехи в области естествознания вызвали значительный интерес к электрическим и магнитным явлениям и привели к открытию ранее неизвестных фактов. Были обнаружены два рода электричества и выявлены законы их взаимодействия, установлена «быстрота передачи электричества». Создаются новые электрические приборы, позволившие получать и накапливать электричество в больших количествах, а также измерять его интенсивность, начинается изучение явлений атмосферного электричества, разрабатываются первые теории электрических явлений.

В результате многочисленных экспериментов Стефану Грею (1670–1736) удалось установить, что «электрическая способность» стеклянной трубки притягивать легкие тела может быть передана другим телам, и показать (1729), что тела в зависимости от их отношения к электричеству можно разделить на две группы: проводники (например металлическая нить, проволока) и непроводники (например шелковая нить).

Продолжая опыты Грея Шарль Франсуа Дюфе (1698–1737) обнаружил (1733–1737) два рода электричества («стеклянное» и «смоляное») и их способность отталкивать одноименные заряды и притягивать противоположные. Он также создал прототип электроскопа в виде двух подвешенных нитей, расходящихся при их электризации.

Вопросы для самопроверки

1. *Что собой представляла первая простейшая электростатическая машина и как она была усовершенствована позднее?*
2. *Какие опыты были проведены Греем?*

1.4. Изобретение лейденской банки

После того как было установлено разделение тел на проводники и непроводники, а опыты с электростатическими машинами получили широчайшее распространение, совершенно естественной была попытка «накопить» электрические заряды в каком-то стеклянном сосуде, который

мог их сохранить. Среди многих физиков, занимавшихся подобными экспериментами, наибольшую известность получил голландский профессор из города Лейдена Мусхенбрук (Мушенбрек) (1692–1761), который в 1745 г. изобрел лейденскую банку. Он взял стеклянную банку (колбу), наполненную водой, опустил в нее медную проволоку, висевшую на кондукторе электростатической машины, и, подняв банку правой рукой, попросил своего помощника вращать шар машины. После того как в банке, по его мнению, накопилось достаточное количество зарядов, он решил левой рукой отсоединить медную проволоку и при этом ощутил сильный удар. Ему показалось, что «пришел конец». Так была изобретена лейденская банка (по имени города Лейдена). Вскоре им был изобретен простейший конденсатор, одно из самых распространенных электрических устройств. В том же 1745 г. независимо от Мусхенбрука к созданию лейденской банки пришел немецкий ученый Э.Г. Клейст. В 1746–1747 гг. первые теории лейденской банки разработали американские ученые Б. Франклин и англичанин В. Уатсон.

Одним из важнейших последствий изобретения лейденской банки явилось установление влияния электрических разрядов на организм человека, что привело к зарождению электромедицины. Это было первое сравнительно широкое применение электричества, сыгравшую большую роль в углублении изучения электрических явлений. Опыт Мусхенбрука был повторен в присутствии французского короля аббатом Нолле. Он образовал цепь из 180 гвардейцев, взявшихся за руки, при чем первый держал лейденскую банку в руке, а последний прикоснулся к проволоке, извлекая искру. Удар почувствовали все в один момент. От этой цепи людей и произошел термин «электрическая цепь».

При проведении исследований с лейденской банкой англичанином Б. Вильсоном было установлено в 1746 г., что количество электричества, собираемое в банке, пропорционально размеру обкладок (внутреннюю и наружную поверхность банки стали покрывать оловянной фольгой) и обратно пропорционально толщине изоляционного слоя. В 70-х гг. XVIII в. металлические пластины стали разделять не стеклом, а воздушным промежутком – так появился простейший конденсатор.

Вопросы для самоконтроля

1. Что явилось продолжением изобретения лейденской банки?
2. При проведении исследований с лейденской банкой что было установлено Б. Вильсоном.

1.5. Научное обоснование явлений атмосферного электричества

Важным шагом на пути изучения электрических явлений был переход от качественных наблюдений к установлению количественных связей и закономерностей, к разработке основ теории электричества. Наиболее значительный вклад в решение этих проблем был сделан петербургскими

академиками М.В. Ломоносовым и Г.В. Рихманом, а также американским ученым Б. Франклином.

М.В. Ломоносов (1711–1765) явился в России основоположником изучения электрических явлений, автором первой теории электричества. При его поддержке Рихман (1711–1753) разработал в 1745 г. оригинальную конструкцию первого электроизмерительного прибора непосредственной оценки – «электрического указателя», который принципиально отличался от электроскопа тем, что был снабжен деревянным квадрантом со шкалой, разделенной на градусы. Именно это усовершенствование (по словам Рихмана) позволило измерять «большую или меньшую степень электричества». До Рихмана систематическим изучением электричества не занимались. «Электрический указатель» Ломоносов и Рихман использовали при создании «громовой машины» – первой стационарной установки для наблюдения за интенсивностью электрических разрядов в атмосфере. «Громовая машина» в принципе отличалась от электрического змея Франклина и приспособлений других исследователей. Она позволяла непрерывно наблюдать за изменением электричества, содержащегося в атмосфере при любой погоде. С помощью «громовой машины» Ломоносов и Рихман установили, что электричество содержится в атмосфере и при отсутствии грозы. Они убедительно доказали, что молния – это электрические разряды в атмосфере.

Выводы Ломоносова послужили одной из основ впервые разработанной им теории атмосферного электричества (ноябрь 1753 г.). В это время он выступил с докладом «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих, предложенное от Михайла Ломоносова». В докладе впервые была изложена разработанная им строго научная материалистическая теория атмосферного электричества, которая – по утверждению современных специалистов, в своей принципиальной основе вполне соответствует нынешнему представлению об этих явлениях.

По утверждению Ломоносова атмосферное электричество возникает в результате трения пылинок и других взвешенных частичек воздуха с капельками воды, происходящего при вертикальном перемещении воздушных потоков.

В отличие от большинства своих современников Ломоносов рассматривал электричество как форму движения эфира, а не особой электрической материи. «Эфирная» теория электричества, разработанная Ломоносовым, была передовой для своего времени. Она явилась новым шагом к материалистическому объяснению явлений природы и получила дальнейшее развитие в трудах Эйлера, а позднее, в XIX в., ее придерживались Фарадей и другие крупнейшие ученые.

Северные сияния, по мнению Ломоносова, также имеют электрическую природу. Он рассматривал их как свечение, вызываемое в верхних слоях атмосферы электрическими зарядами. Им были проделаны интересные опыты со свечением разряженного воздуха в стеклянном наэлек-

тризованном шаре – это свечение он сравнил с северным сиянием. Наблюдавшееся Ломоносовым свечение было по существу явлением электрического разряда в разряженном воздухе.

В поисках более безопасных методов измерения «электрической громовой силы» Ломоносов разработал своеобразный автоматический регистратор максимальной величины грозового разряда. Основываясь на многочисленных опытах, Ломоносов пришел к выводу о целесообразности применения громоотводов, при чем в отличие от Франклина правильно указал на решающую роль заземления в устройстве громоотвода.

Весьма оригинальные представления о сущности электрических явлений были высказаны известным русским ученым А.Т. Болотовым (1738–1833) в фундаментальном труде «Краткие и на опытности основанные замечания о электрицизме и о способности электрических машин к помоганию от разных болезней» (Санкт-Петербург, 1803). Он в частности писал: «... но в том сомневаться не можно, что она («электрическая материя») по примеру других состоит из частичек и что частичкам сим надо быть чрезвычайной непостижимой для нас мализны, причем эти частички способны к движению, которое происходит с непостижимой скоростью. По их действию и способности к быстрому передвижению ... догадываться только можем, что надлежит им быть только круглыми». Следует отметить, что в этом труде нет стандартных упоминаний об электрической жидкости, хотя с этого начинали изложение сути электрических явлений почти все физики того времени. Большой вклад в изучение электрических явлений, и в особенности атмосферного электричества, был сделан известным американским ученым Б. Франклином (1706–1790). Им были произведены (1747–1752) многочисленные опыты по улавливанию и изучению атмосферного электричества, усовершенствован молниеотвод, разработана так называемая «унитарная» теория электричества (1747). Б. Франклин высказал правильное предположение о материальном характере электричества. Ему удалось подойти к представлению «электризации через влияние», т.е. к явлению электростатической индукции. Знаменитый опыт Франклина (июнь 1752 г.) с воздушным («электрическим») змеем убедительно показал возможность «извлечения» электричества из облаков, которым он заряжал лейденскую банку, подобно тому, как это осуществлялось посредством электростатической машины. Он первый соорудил батарею из лейденских банок.

Вопросы для самопроверки

1. Какой вклад внес в разработку основ теории электричества Ломоносов М.В.?
2. Как назывался первый электроизмерительный прибор непосредственной оценки, разработанный Рихманом и Ломоносовым?
3. Каково было представление о сущности электрических явлений Болотова А.Т.?

1.6. О «сходстве и подобии» электрических и магнитных явлений

Постепенно электрические эксперименты все больше превращаются в мощные средства познания неизведанных тайн природы. Мировую известность приобрел трактат петербургского академика Франца Ульриха Теодора Эпинуса (1724–1802) «Опыт теории электричества и магнетизма», изданный в Санкт-Петербурге (1759). Эпинус впервые указал на связь между электрическими и магнитными явлениями. В своей речи на общем собрании в Академии наук в 1758 г. он говорил не только о некоем союзе и сходстве магнитной и электрической силы, но и сокровенном обеих сил точном подобии. Независимо от Эпинуса итальянский ученый Д. Беккария (1716–1781) в 1758 г. выдвинул гипотезу о существовании тесной связи между «циркуляцией электрического флюида и магнетизмом». Ф. Эпинусу принадлежит открытие явления электростатической индукции. Он впервые отверг утверждение Франклина об особой роли стекла в лейденской банке и применил плоский конденсатор с воздушной прослойкой. Эпинусом были поставлены эксперименты, воспроизводящие явления, имеющие место в приборе, названном позднее электрофором. Изобретение электрофора (простейшей электростатической машины, действующей на основе возбуждения зарядов через влияние) обычно приписывают А. Вольта, но сам он отмечал, что Эпинус осуществил на практике идею электрофора, хотя и не сконструировал законченного лабораторного прибора.

Заслуживает внимание попытка Эпинуса впервые применить математические расчеты для характеристики взаимодействия заряженных тел. При этом он задолго до Кулона высказал предположение о том, что силы взаимодействия электрических и магнитных зарядов изменяются обратно пропорционально квадратам расстояния между ними. Эпинусом также была высказана правильная мысль о сохранении количества электричества.

В возникновении понятий потенциала (напряжение) и емкости необходимо отметить большой вклад выдающегося итальянского физика А. Вольта (1745–1827). Его по праву можно назвать основателем электрической метрологии. В ряде своих работ (1778–1782) он четко формулирует количественные зависимости между электрическим зарядом, емкостью и напряжением. А. Вольта создал более совершенные электрофоры и электроскопы, в частности конденсаторный электроскоп.

Среди ряда теорий электричества, разработанных в XVIII веке, заслуживает внимания теория петербургского академика Л. Эйлера (1707–1783) – одного из выдающихся ученых своего времени. Эта теория является дальнейшим развитием идей Ломоносова и приближается к эфирным теориям электричества XIX в.

Углубление исследований в области статического электричества не могло не привести к опровержению ряда ошибочных выводов, сделанных

физиками в начальный период изучения этих явлений. Одним из таких ошибочных выводов было утверждение о невозможности электризации металлов трением. В конце XVIII в. ряд европейских ученых, а также выдающийся русский физик и электротехник академик В.В. Петров, приходят к заключению, что металлы могут быть наэлектризованы посредством трения при условии их тщательной изоляции. Наиболее убедительно это было показано Петровым в его труде «Новые электрические опыты», изданном в 1804 г. Он показал, что особенно эффективным способом электризации металлов является «стегание» их выделанным мехом некоторых животных. Им также был разработан ряд новых методов электризации различных тел. В.В. Петров правильно установил влияние размеров, температуры и состояние поверхности тел, влажности окружающего воздуха на интенсивность электризации. Эти выводы, а также его указания на неустойчивость явлений электризации тел подтверждены современными исследователями.

Заслуживает внимания утверждение Петрова о возможности электризации человеческого тела посредством «стегания» – это позволило врачам применять электролечение без электростатической машины, которую не всякий медик мог иметь в своем распоряжении. Петров подверг специальному изучению явления статического электричества в разряженном воздухе и в атмосфере различных газов. Он убедительно подтвердил возрастание электрической проводимости воздуха при его нагревании, обнаружил образование окислов азота при электрических разрядах в воздухе.

Важнейшим шагом в развитии качественных исследований электрических и магнитных явлений было установление закона о силе взаимодействия между наэлектризованными телами и магнитными полюсами. Этими вопросами занимались многие ученые, но наибольших успехов сумел достичь французский военный инженер Шарль Огюстен Кулон (1736–1806). В результате многочисленных экспериментов на «крутильных весах» (прибор, который позволял измерять «мельчайшие степени силы») он установил, что сила взаимодействия наэлектризованных тел пропорциональна «количеству электричества» (этот термин был введен им в науку впервые) заряженных тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Так был открыт Кулоном знаменитый закон, носящий его имя. Этот закон он распространил и на взаимодействие магнитных полюсов. Кулоном аналитически и экспериментально было доказано, что электричество распространяется по поверхности проводника, а также равномерно распространяется по поверхности изолированной проводящей сферы. Исследования Кулона способствовали применению математического анализа в теории электричества и магнетизма, распространению математического понятия потенциала (ранее введенного в механику) на электрические и магнитные поля.

В результате многочисленных экспериментов с электростатическими машинами и в особенности после изобретения лейденской банки стало очевидным влияние электрических разрядов на организм человека. Исследованиями способов воздействия электричества на организм человека в течение многих лет занимался А.Т. Болотов. Им впервые в России была создана стационарная электролечебница с разнообразным набором инструментов и приборов для осуществления процедур.

Значительный вклад в электромедицину был сделан академиком Петровым, который использовал не только электростатические машины, но и электрохимические источники, в частности, созданную им уникальную гальваническую батарею.

Успехи в области исследования электростатических явлений и их практического применения, достигнутые к концу XVIII в., подготовили почву для открытия новых, ранее неизвестных явлений создания источников постоянного электрического тока, изучения его свойств. Все это привело к становлению и последующему бурному развитию электротехники.

Вопросы для самопроверки

- 1. Как вы понимаете «сходство и подобие» электрических и магнитных явлений?*
- 2. Объясните историю возникновения понятий потенциала и емкости.*
- 3. Что представлял собой труд Петрова В.В. «Новые электрические опыты»?*
- 4. Что вы знаете об открытии закона Кулона? Сформулируйте его.*
- 5. Что вы знаете об исследованиях влияния электричества на организм человека?*

Тема 2. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И ЗАКЛАДКА ФУНДАМЕНТА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

2.1. Открытие электрического тока

В течение многих столетий вплоть до последней четверти XVIII в. ученым были известны только явления статического электричества. Промышленный переворот XVIII в. дал мощный толчок к развитию различных отраслей науки, в том числе науки об электричестве. В изучении электрических явлений были достигнуты определенные успехи, ими начинают все более интересоваться не только физики, но и естествоиспытатели, в особенности врачи, пытавшиеся (и не безуспешно) применять электричество для лечебных целей.

Отдельные ученые высказывали предположение, что если «вся природа электрическая», то в организме человека и животных по жилам и

мускулам должна протекать эта таинственная материя. Так возникло представление о новом виде электричества, названного «животным». Исследованиями мышечных движений лягушек под воздействием электричества занялся в 1773 г. профессор анатомии Болонского университета Л. Гальвани (1737–1798). Первые электрофизиологические опыты над лягушками относятся к 1780 г. Гальвани сделал правильное предположение о том, что сокращение мышц вызывается действием электрических сил, что мышцы и нервы образуют как бы две обкладки лейденской банки. Он высказал мысль для объяснения наблюдавшихся им фактов, что источником возникновения электричества является сама лягушка. Опыты Гальвани вызвали большой интерес. Взгляды физиков на явления, наблюдаемые Гальвани, разошлись. Одни соглашались с Гальвани и считали, что «животное» электричество имеет совершенно иную природу, чем электричество трения, другие отождествляли оба вида электричества; наконец третья группа физиков оспаривала вообще существование «животного» электричества. К этой группе принадлежал профессор физики в Павийском университете А. Вольта (1745–1827). В течение нескольких лет (1792–1795) он не только повторил все опыты Гальвани, но и произвел ряд новых исследований. А. Вольта прежде всего обратил внимание на то, что сокращение мышц наиболее интенсивно происходит при использовании двух разнородных металлов. Он отверг идеи Гальвани о «животном» электричестве и пришел к выводу, что источником электричества является контакт двух разнородных металлов. Силу, возникающую при контакте двух металлов, А. Вольта назвал электровозбудительной или электродвижущей силой. Эта сила «перемещает электричество так, что получается разность напряжений» (между металлами). С современной точки зрения совершенно очевидна ошибочность идеи А. Вольта о возможности получения электрического тока посредством простого контакта разнородных металлов, т.е. получение электрической энергии без затраты для этого какого-либо другого вида энергии. Многочисленные эксперименты привели А. Вольта к выводу, что непрерывный электрический «флюид» может возникнуть лишь в замкнутой цепи, составленной из различных проводников – металлов (которые он назвал проводниками первого класса) и жидкостей (названный им проводниками второго класса). Опыты А. Вольта завершились построением в 1799 г. первого источника непрерывного электрического тока, составленного из медных и цинковых кружков (пар), переложенных суконными прокладками, смоченными водой или кислотой. Этот прибор, о котором он впервые сообщил президенту Лондонского королевского общества в марте 1800 г., был назван им электродвижущим аппаратом, а позднее французы начали его называть «гальваническим или вольтовым столбом». Таким образом, А. Вольта не понимая того, что электрический ток возникает в результате химических процессов между металлами и жидкостями, прак-

тически пришел к созданию гальванического элемента, действие которого основывалось именно на превращении химической энергии в электрическую. Кроме «столба», А. Вольта предложил еще и несколько иную конструкцию источника электрического тока – так называемую чашечную батарею. Создание «вольтова столба» подготовило почву для закладки фундамента электротехники. «Вольтов столб» – первый источник непрерывного электрического тока, сыгравший громадную роль как в развитии науки об электричестве, так и в расширении его практических применений. В различных модификациях он долго оставался единственным источником электрического тока. Крупнейшие ученые первой половины XIX в. – Петров, Дэви, Фарадей – широко применяли «вольтов столб» для своих опытов. Заслуживает внимания трактат А. Вольта «Об идентичности гальванического и электрического флюидов», его высказывания о сходстве электричества и магнетизма. Современники называли А. Вольта самым великим физиком, жившим в Италии после Галилея. А. Вольта был членом многих академий, в том числе почетным членом Петербургской Академии наук. В 1881 г. на Международном конгрессе электриков в Париже единице напряжения было присвоено наименование «Вольт».

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основоположников открытия электрического тока.
2. Поясните конструкцию «вольтова столба».

2.2. Обнаружение и изучение действий электрического тока

Исследования электрического тока, проводившиеся в большом масштабе в первые годы XIX в., привели к открытию химических, тепловых, световых и магнитных действий. В 1800 г. члены Лондонского королевского общества А. Карлейль и В. Никольсон провели ряд опытов с «вольтовым столбом», которые позволили им открыть новое явление: при прохождении тока через воду имело место выделение пузырьков. Они правильно установили, что это кислород и водород. Таким образом, был осуществлен электролиз воды. После открытия действия тока на воду ряд ученых заинтересовался вопросом о том, к каким результатам приведет пропускание тока через другие жидкости. Указанные эксперименты положили начало исследованию химических действий электрического тока, получивших в последствии важное практическое применение.

Тепловые действия тока были обнаружены в накаливании тонких металлических проводников и воспламенении посредством искр легковоспламеняющихся веществ. Световые действия наблюдались в виде искр различной длины и яркости.

В 1802 г. итальянский физик Д. Романьози обнаружил, что электрический ток, протекающий по проводнику, вызывает отклонение свободно вращающейся магнитной стрелки, находящейся вблизи этого проводника.

Среди многочисленных исследований явлений электрического тока, проведенных в первые годы после создания «вольтова столба», наиболее выдающимися были труды первого русского электротехника, профессора физики Петербургской медико-хирургической академии В.В. Петрова (1761–1834), т.к. в них впервые была показана и доказана возможность практических применений электрического тока. В.В. Петров был не только выдающимся физиком и химиком, но и блестящим педагогом, основателем первого крупного физического кабинета превосходнейшего по всей Российской империи. Исследуя «светоносные» электрические явления он открыл электрическую дугу и ряд закономерностей электрического разряда в воздухе. В своих трудах по электричеству Петров собрал опытный материал, который им был тщательно проанализирован. Будучи хорошо знакомым с опытами, производившимися с «вольтовым столбом» как в России, так и за рубежом, Петров пришел к выводу, что наиболее полное и всестороннее изучение гальванических явлений возможно лишь при условии создания большой батареи (по современной терминологии – источника тока высокого напряжения).

В апреле 1802 г. батарея В.В. Петрова, состоявшая из 4200 медных и цинковых кружков, или 2100 медно-цинковых пар, была готова. Общая длина гальванической батареи В.В. Петрова составляла 12 м – это был крупнейший в мире источник электрического тока. Как показали современные экспериментальные исследования с моделью батареи В.В. Петрова, электродвижущая сила этой батареи была около 1700 В, а максимальная полезная мощность 60–85 Вт. Ток короткого замыкания батареи не превышал 0,1–0,2 А. Свои разнообразные опыты В.В. Петров подробно описал в книге «Известие о гальвановольтовых опытах», которая вышла в Санкт-Петербурге в 1803 г. Это была первая книга на русском языке, посвященная исследованиям явлений электрического тока. В книге В.В. Петрова изложены его опыты по электролизу различных жидкостей, исследованию явлений прохождения электрического тока в разряженном воздухе, наблюдению световых явлений, сопровождающих действия электрического тока, изучению тепловых действий тока.

В.В. Петровым была впервые установлена важнейшая закономерность в электрической цепи – зависимость тока в проводнике от площади поперечного сечения проводника. Им также впервые введен в электротехнический язык термин «сопротивление». Наибольший интерес из всех работ В.В. Петрова представляет открытие им в 1802 г. явления электрической дуги между двумя угольными электродами, соединенными с полюсами батареи. Создание им источника высокого напряжения явилось необходимым условием для получения устойчивой электрической дуги при небольших токах. Указывая на возможность широкого практического применения электрической дуги, В.В. Петров писал, что пламенем дуги «темный покой довольно ясно освещен быть может», что в пламени дуги

различные «металлы иногда мгновенно расплавляются, сгорают...», что «посредством огня» дуги он превращал окислы различных металлов в «металлический вид». Опыты В.В. Петрова давали указания на возможность применения электричества для целей освещения, плавки металлов и восстановления металлов из их окислов. До В.В. Петрова никто так ясно и четко не указывал на возможность практического применения электричества, поэтому он является одним из основоположников электротехники.

В.В. Петровым было положено начало всестороннему исследованию явлений электрического разряда в вакууме. Он установил зависимость этих явлений от материала, формы и полярности электродов, расстояния между ними и степени вакуума. Им была определена электропроводность некоторых веществ (древесного угля, льда, серы, фарфора, растительных масел) и выявлены их физико-химические свойства. В.В. Петров впервые применил параллельное соединение электродов для демонстрации явления электролиза в нескольких трубках с водой, происходящего одновременно при пропускании электрического тока через жидкость. Работа В.В. Петрова с источником высокого напряжения неизбежно привела его к выводу о важном значении изоляции проводов. Им было предложено изготавливать электрические проводники, покрытые сургучом или воском. Разработанный Петровым принцип изоляции проволочных проводников, заключающийся в покрытии их поверхности изолирующим слоем, нашел дальнейшее развитие в производстве кабельных изделий. Петров пришел также к выводу о высоких электроизоляционных свойствах жирных растительных масел. Труды Петрова были хорошо известны его современникам и изучались русскими физиками первой трети XIX в., что не могло не оказать заметного влияния на развитие науки об электричестве, на расширение его практических применений. Первые электрохимические опыты, проведенные вскоре после изобретения вольтова столба, вызвали значительный интерес к этим вопросам. Специальному исследованию электрохимических явлений были посвящены труды английского ученого Х. Дэви, имевшие важное значение для практики. Он показал, что кислоты и основания, получаемые при электролизе, являются продуктами последующих вторичных реакций. Дэви установил, что химически чистая вода не поддается электролизу и что электрический ток только разлагает соединения, но не создает новых соединений. Он одним из первых высказал мнение о том, что электрический ток, полученный от «вольтова столба», возникает в результате химических процессов между металлами и электролитом. В 1807 г. Дэви впервые получил электролитическим путем щелочные элементы калий и натрий, ранее неизвестные в чистом виде. В 1808 г. им были получены магний, бор, барий, стронций.

В 1802–1807 гг. рядом ученых, в том числе профессору Московского университета П.И. Страхову (1756–1827) удалось установить опытным

путем, что земля и вода являются проводниками электрического тока. Этим открытием была создана возможность применения земли и воды в качестве обратного (второго) провода при осуществлении установок и устройств для передачи электрического тока от генератора к приемникам. В 1807 г. профессор Московского университета Ф.Ф. Рейс (1778–1852) обнаружил явление, получившее название электроосмоса (под действием электричества жидкость может переноситься сквозь пористые тела). Явление электроосмоса в современной технике получило практическое применение, в частности при осушке намываемых плотин (электродренаж). Петербургским академиком Г. Парротом (1767–1852) впервые наиболее четко была разработана химическая теории гальванизма (вместо контактной теории Вольты), в которой утверждалось, что явления в «вольтовом столбе» и других гальванических элементах происходят исключительно посредством окисления металлов, т.е. за счет изменения одного из веществ элемента. Теории электролиза были предложены рядом ученых. Наиболее приближающаяся к современным воззрениям на процессы электролиза явилась теория электролиза Т. Гротгуса (1785–1822), которая по существу была первой теорией электрохимических явлений (1805). Важными особенностями теории Гротгуса явились, во-первых, указание на то, что частицы воды поляризуются еще до замыкания цепи (положительно заряженный водород, отрицательно заряженный кислород) и, во-вторых, объяснение разложения нейтральной молекулы воды на положительный и отрицательный ионы (вследствие трения или соприкосновении друг с другом частиц воды). Теория Гротгуса продержалась в науке более 70 лет, уступив место теории электрохимической диссоциации. Законы электролиза были сформулированы М. Фарадеем в 1833–1834 гг. Им же предложены термины «электрод», «анод», «катод».

Вопросы для самопроверки:

1. Как было открыто действие электрического тока?
2. Какой вклад внес Петров В.В. в изучение действий электрического тока?
3. Какие еще ученые, помимо Петрова В.В. занимались изучением электричества в XVIII–XIX вв.?

2.3. Взаимодействие электрического тока и магнита. Разработка основ электродинамики

В 1820 г. были опубликованы и продемонстрированы опыты Г.Х. Эрстеда по наблюдению действия тока на магнитную стрелку, возбудившие большой интерес среди ученых разных стран, получившие в их трудах дальнейшее углубление и развитие. Вскоре после опубликования брошюры Эрстеда о своих опытах немецкий физик Иоганн Х.С. Швейггер (1779–1857) предложил использовать отклонение магнитной стрелки

электрическим током для создания первого измерительного прибора – индикатора тока (1820.). Его прибор, получивший название мультипликатора (т.е. умножающего) представлял собой магнитную стрелку, помещенную внутри рамки, состоящей из нескольких витков проволоки. Однако вследствие влияния земного магнетизма на магнитную стрелку мультипликатора его показания были неточными. Ампер в 1821 г. показал возможность устранения влияния земного магнетизма с помощью аstaticеской пары. В 1825 г. флорентийский профессор Л. Нобили (1784–1835) скомбинировал аstaticескую пару с мультипликатором и создал таким образом более чувствительный прибор – прообраз гальванометра.

В 1820 г. Д.Ф. Араго обнаружил новое явление – намагничивание проводника протекающим по нему током. По рекомендации Ампера Араго заменил прямолинейную проволоку проволочной спиралью. При этом намагничивание иголки, помещенной внутри спирали, усиливалось. Так был создан соленоид. Опыты Араго впервые показали электрическую природу магнетизма и возможность намагничивания стали электрическим током. Новым шагом от качественных наблюдений действия тока на магнит к определению их количественной зависимости явилось установление французскими учеными Ж.Б. Био (1774–1862) и Ф. Саваром (1791–1841) закона действия тока на магнит. Проведя ряд экспериментов, они установили (1820) следующее: если неограниченной длины провод с проходящим по нему вольтовым током действует на частицу северного или южного магнетизма, находящегося на известном расстоянии от середины провода, то равнодействующая всех сил, исходящих из провода, направлена перпендикулярно к кратчайшему расстоянию частицы от провода, и общее действие провода на любой (южный или северный) магнитный элемент обратно пропорционально расстоянию последнего до провода. Обнаружение Био и Саваром тангенциальной составляющей силы позволило объяснить вращательный характер движения проводника вокруг магнита.

Важнейшее научное и методологическое значение в расширении исследований новых явлений имели труды одного из крупнейших ученых – А.М. Ампера (1775–1836), заложившие основы электродинамики. Поразительна логика его обобщений: если ток – это магнит, то два тока должны взаимодействовать подобно магнитам. До Ампера никто так четко на это не указывал. Ампером впервые был введен термин «электрический ток» и понятие о направлении электрического тока. Он предложил считать за направление электричества (от плюса к минусу во внешней цепи). Наблюдая отклонение магнитной стрелки под влиянием протекающего по проводнику тока, Ампер сумел сформулировать правило, позволяющее определить направление отклонения магнитной стрелки в зависимости от направления тока в проводнике. Особенно важное значение имели иссле-

дования Ампером взаимодействия круговых линейных токов. К этим исследованиям он подошел, основываясь на следующих рассуждениях: если магнит по своим свойствам аналогичен катушке или кольцевому проводнику, обтекаемому током, то два круговых тока должны действовать друг на друга подобно двум магнитам. Открыв взаимодействие двух круговых токов, Ампер начал исследование линейных токов и установил закон их взаимодействия: два параллельных и одинаково направленных тока взаимно притягиваются, между тем как два параллельных и противоположно направленных тока взаимно отталкиваются. Обнаруженные явления Ампер предложил назвать электродинамическими в отличие от электростатических. Обобщая результаты своих экспериментальных работ, Ампер вывел математическое выражение для силы взаимодействия токов. Первый мемуар Ампера о взаимодействии электрических токов был опубликован в 1820 г. Электродинамическая теория изложена им в сочинении «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно экспериментально из опыта», изданном в Париже в 1826–1827 гг. Опираясь на труды предшественников, а также на результаты своих исследований, он пришел к принципиально новому выводу о причине явлений магнетизма. Отрицая существование особых магнитных жидкостей, Ампер утверждал, что магнитное поле имеет электрическое происхождение. Основываясь на тождестве действия круговых токов и магнитов, он пришел к выводу о том, что магнетизм какой-либо частицы обусловлен наличием круговых токов в этой частице, а свойства магнита в целом обусловлены электрическими токами, расположенными в плоскостях, перпендикулярных к его оси. Разработанная Ампером гипотеза молекулярных круговых токов явилась новым прогрессивным шагом на пути к материалистической трактовке природы магнитных явлений.

Значение работ Ампера для науки было весьма велико. Своими исследованиями он доказал единство электричества и магнетизма и опроверг царившее до него представление о магнитной жидкости. Установленные им законы механического взаимодействия электрических токов принадлежат к числу крупных открытий в области электричества. Выдающийся вклад Ампера получил высочайшую оценку. Первый международный конгресс электриков присвоил в 1881 г. единице силы тока наименование «Ампер». Его заслуженно называли «Ньютоном электричества». Он был членом Парижской Академии наук (с 1814 г.) и многих других Академий мира, в том числе и Петербургской (с 1830 г.).

Вопросы для самопроверки

1. *Что представлял собой «мультипликатор Швейгера»?*
2. *Расскажите о серии опытов, проведенных Араго Д. Ф.*
3. *Какие опыты были проведены Ампером?*

2.4. Открытие термоэлектричества

Дальнейшее изучение явлений электричества и магнетизма привело к открытию новых фактов. В 1821 г. профессор Берлинского университета Т.И. Зеебек (1770–1731), занимаясь исследованиями возможности получения электрического тока посредством двух разнородных металлов без участия какой-либо жидкости, открыл новое явление, заключавшееся в следующем. К висмутовой пластине была припаяна медная пластинка. Внутри образовавшегося контура помещалась магнитная стрелка. При нагревании одного из спаев магнитная стрелка отклонялась, что указывало на прохождение по контуру электрического тока. Если вместо нагревания одного спая охлаждать другой спай, то в контуре возникает ток такого же направления, как и в предыдущем случае. Зеебек установил, что причина появления электрического тока в этих опытах связана с теплотой, сообщаемой спаю или отнимаемой от него, и назвал обнаруженное явление термомагнетизмом (позднее этот термин был заменен на термоэлектричество). В течение длительного периода времени термоэлементы вследствие их крайней неэкономичности, как правило, применялись только для измерения температур. Благодаря успехам современной науки и техники в области полупроводников созданы предпосылки для разработки более экономичных термоэлементов.

В 1834 г. французским ученым Жаном Ш.А. Пельтье (1785–1845) было обнаружено широкое проявление термоэлектрических действий и их обратимость. При прохождении электрического тока через спай двух различных металлов имеет место выделение или поглощение тепла, в зависимости от направления тока. В 1838 г. явление Пельтье было изучено в Санкт-Петербурге академиком Э.Х. Ленцем, который пользуясь этим методом, заморозил воду, окружающую спай. Позднее были созданы специальные устройства – термопары, применяемые для измерения температур, лучистой энергии и др. Открытие явления термоэлектричества стало существенным вкладом в науку и сыграло свою роль в подготовке к открытию закона сохранения и превращении энергии.

Вопросы для самопроверки

1. В чём заключалась суть явления термоэлектричества?
2. Какие опыты были проведены Зеебеком и Пельтье?

2.5. Установление законов электрической цепи

Как уже отмечалось, еще В.В. Петров в начале XIX в. указал на связь между сечением проводника и протекающим по нему током. В 1821 г. Х. Дэви установил, что проводимость проводника зависит от его материала и температуры. Он также пришел к выводу о зависимости проводимости от площади сечения проводника. Более глубоко эти связи были исследованы немецким физиком Г.С. Омом (1789–1854) Первый этап

исследований, начатых Омом в 1721 г., относился к изучению проводимости различных проводников. Ему удалось установить проводимость проволок из различных материалов и доказать влияние температуры на проводимость проводников. На основе многочисленных экспериментов Ом выводит формулу, связывающую силу магнитного действия проводника (т.е. ток) с электровозбуждающей силой источника и сопротивлением цепи. Это уже был закон электрической цепи. Продолжая совершенствовать измерительную технику, Ом разрабатывает оригинальные теоретические положения, характеризующие процессы в электрических цепях. С этой целью он внимательно изучает теоретические исследования в области теплопроводности и гидравлики и впервые проводит аналогию между движением электричества и тепловыми или водными потоками, при этом разность потенциалов играет роль падения температур или разности уровней воды в трубах. В 1827 г. выходит в свет его фундаментальный труд «Теоретические исследования электрических цепей». Закон, носящий его имя, Ом сформулировал следующим образом: «Величина тока в гальванической цепи пропорциональна сумме всех напряжений и обратно пропорциональна сумме приведенных длин» (под приведенными длинами подразумевается сопротивление внешней части электрической цепи). Если цепь питается от батареи, то ток пропорционален электродвижущей силе (ЭДС), а в знаменателе кроме сопротивления цепи указывается и внутреннее сопротивление элемента. Несколько лет закон Ома не получал признания. Однако после подтверждения правильности закона Ома такими известными электротехниками, как петербургские академики Э.Х. Ленц и Б.С. Якоби, а также присуждения Ому Золотой медали Лондонским королевским обществом (1842), его труд получил всеобщее признание. Труд Ома явился фундаментом теоретической электротехники и сохранил свое значение до наших дней. На первом Международном конгрессе электриков единица сопротивления была названа «Ом».

Выдающиеся открытия в области электричества и магнетизма, связанные с именами Ампера, Ома, Фарадея, Ленца, требовали более точного описания этих явлений, их математического анализа и разработки расчетных методов, необходимых для решения практических задач, выдвигаемых развивающимся производством. Значительным вкладом в решение этих проблем явились труды профессора Берлинского университета Г.Р. Кирхгофа (1824–1887). В 1845 г., когда Кирхгофу был всего 21 год, он написал работу «О протекании электрического тока через плоскую пластину, например, круглой формы». В примечании к этой работе были сформулированы два закона Кирхгофа, являющихся фундаментальными законами электротехники, которые еще при его жизни вошли во все учебники физики и широко применяются электротехниками всего мира. В последующих трудах Кирхгофа были рассмотрены электрические токи в проводящих средах, исследованы количественные соотношения, свя-

занные с явлением электромагнитной индукции и изучением переходных процессов. Он проявил себя как блестящий экспериментатор и исследователь в различных областях физики (механике, оптике, теории излучения). Г.Р. Кирхгоф был членом Берлинской академии и членом-корреспондентом Петербургской академии наук (с 1882 г.).

Вопросы для самопроверки

1. Какие законы электрической цепи вам известны и как они были открыты?
2. Каков вклад Кирхгофа в область электричества и магнетизма?

Тема 3. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

3.1. Открытие электромагнитной индукции

Истоки современной электротехники связаны с трудами английского ученого М. Фарадея (1791–1867), которые, в свою очередь, были подготовлены предшествовавшими работами по изучению электрических и магнитных явлений. Жизнь великого ученого и его неповторимая по своим методам, содержанию и значению деятельность не только открыли новую главу физики, но и сыграли решающую роль в рождении новых отраслей техники: электротехники и радиотехники. Обычно имя М. Фарадея связывают с самым значительным и поэтому наиболее известным открытием – явлением электромагнитной индукции, сделанным им в 1831 г. Но еще за год до этого, в 1830 г., за исследования в области химии и электромагнетизма Фарадей был избран почетным членом Петербургской академии наук, членом же Лондонского королевского общества (Берлинской академии наук) он был избран еще в 1824 г.

Работам Фарадея в области электричества положило начало исследование так называемых электромагнитных вращений. Из серии опытов Эрстеда, Араго, Ампера, Био, Савара, проведенных в 1820 г., стало известно не только об электричестве, но и о своеобразном взаимодействии тока и магнита: здесь действовали не привычные для классической механики центральные силы, а силы иные, стремящиеся установить магнитную стрелку перпендикулярно проводнику. Фарадей поставил перед собой вопрос: не стремится ли магнит к непрерывному движению вокруг проводника с током? Опыт подтвердил гипотезу. В 1921 г. Фарадей дал описание прибора, с помощью которого им было получено вращение стержневого постоянного магнита вокруг неподвижного проводника с током, скользящего по ртути вокруг полюса магнита. Поскольку в опыте с этим прибором впервые фигурирует магнитоэлектрическое устройство с непрерывным движением, то вполне правомерно начать именно с этого устройства историю электрических машин вообще и электродвигателя в частности. С этого момента у Фарадея начинают складываться представ-

ления о всеобщей «взаимопревращаемости сил». Получив при помощи электромагнетизма непрерывное механическое движение, он ставит перед собой задачу обратить явление, или превратить магнетизм в электричество. На решение этой задачи Фарадей затратил десять лет напряженного труда, провел тысячи опытов. В августе 1831 г. был проведен решающий опыт, а 24 ноября на заседании в Королевском обществе была изложена сущность явления электромагнитной индукции.

Одновременно с Фарадеем электромагнитную индукцию наблюдал американский физик Джозеф Генри (1797–1878). Нетрудно представить себе переживания ученого, будущего президента Американской национальной академии наук, когда он, собираясь опубликовать свои наблюдения, узнал о публикации Фарадея. В 1832 г. Генри открыл явление самоиндукции и экстратоки, а также установил зависимость индуктивности цепи от свойств материала и конфигурации сердечников катушек. В 1838 г. Генри изучал «токи высшего порядка», т.е. токи, индуцированные другими индуцированными токами. В 1842 г. продолжение этих исследований привело Генри к открытию колебательного характера разряда конденсатора.

Обратимся к главным опытам Фарадея. Первая серия опытов закончилась экспериментом, демонстрировавшим явление «вольт-электрической» (по терминологии Фарадея) индукции (рис. 1, а–в).

Обнаружив возникновение тока во вторичной цепи 2 при замыкании или размыкании первичной 1, Фарадей поставил эксперимент для выяснения свойств индуцированного тока: внутрь спирали 6, включенную во вторичную цепь, помещалась стальная игла 8 (см. рис. 1, б), которая намагничивалась индуцированными токами. Результат говорил о том, что индуцированный ток подобен току, получаемому непосредственно от гальванической батареи 3. Заменяя картонный или деревянный барабан 4, на которые наматывались первичная и вторичная обмотки, стальным кольцом (см. рис. 1, в), Фарадей обнаружил более интенсивное отклонение стрелки гальванометра 5. Данный опыт указывал на существенную роль среды в электромагнитных процессах. Здесь Фарадей впервые применил устройство, которое можно считать прототипом трансформатора.

Вторая серия опытов иллюстрировала явление электромагнитной индукции, возникшее при отсутствии источника напряжения в первичной цепи. Исходя из того, что катушка, обтекаемая током, идентична магниту, Фарадей заменил источник напряжения двумя постоянными магнитами (рис. 1, г) и наблюдал ток во вторичной обмотке при замыкании и размыкании магнитной цепи. Это явление он назвал магнитоэлектрической индукцией. Позднее им было отмечено, что никакой принципиальной разницы между вольт-электрической и магнитоэлектрической индукцией нет. Впоследствии оба эти явления были объединены термином «электромагнитная индукция». Один из заключительных экспериментов (рис. 1, д, е) демонстрировал появление индуцированного тока при движении посто-

янного 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.

В качестве примера, характеризующего ход мыслей ученого и формирование его представлений об электромагнитном поле, рассмотрим исследование Фарадеем явление, получившего тогда название магнетизма вращения. За много лет до работ Фарадея мореплаватели заметили тормозящее влияние медного корпуса компаса на колебания магнитной стрелки. Как уже отмечалось в 1824 г. Д.Ф. Араго (1786–1853) описал явление магнетизма вращения, удовлетворительно объяснить которое как он, так и другие физики не могли. Сущность явления состояла в следующем. Подковообразный магнит мог вращаться вокруг вертикальной оси, а под его полюсами находился алюминиевый диск, который также мог вращаться на оси, совпадающей по направлению с осью вращения магнита.

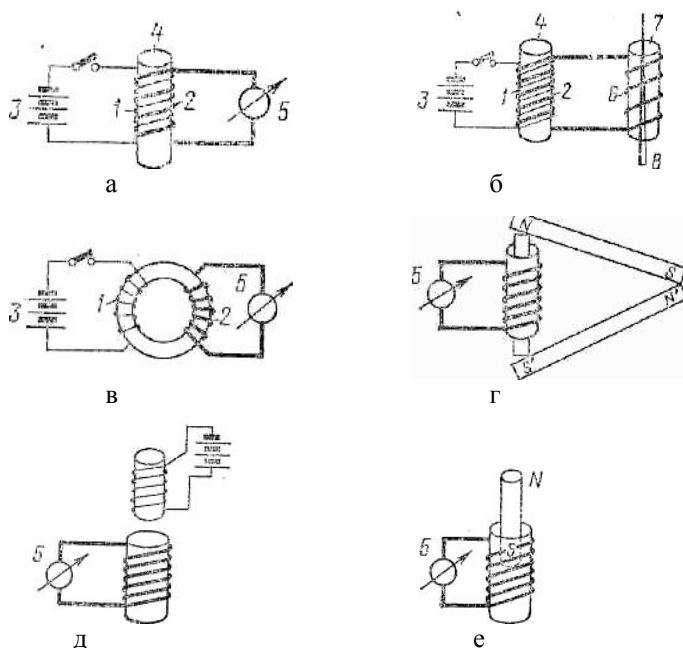


Рис. 1. Схема основных опытов, приведших к открытию электромагнитной индукции (по рисункам Фарадея)

В состоянии покоя никаких взаимодействий между диском и магнитом не наблюдалось. Но стоило начать вращать магнит, как диск устремлялся за ним и наоборот. Чтобы исключить возможность увлечения диска

потоками воздуха, магнит и диск были разделены стеклом. Открытие электромагнитной индукции помогло Фарадею объяснить явление Араго.

Кратко ход его рассуждений можно изложить следующим образом. Алюминиевый диск (или любой другой проводящий, но не магнитный диск) можно представить в виде колеса с бесконечно большим числом спиц – радиальных проводников. При относительном движении магнита и диска эти спицы-проводники «перерезают» магнитные кривые (терминология Фарадея) и в проводниках возникает индуцированный ток. Взаимодействие же тока с магнитом было уже известно.

Фарадей, в противовес сторонникам теории дальнего действия, заполняет пространство, в котором действуют различные силы, материальной средой, эфиром, развивая эфирную теорию Эйлера, находившегося, в свою очередь, под влиянием Ломоносова. Фарадей придавал магнитным, а затем при исследовании диэлектриков и электрическим силовым линиям физическую реальность, наделяя их свойством упругости, и находил очень правдоподобные объяснения самым различным электромагнитным явлениям, пользуясь представлениями об этих упругих линиях, похожих на резиновые нити. До настоящего времени не найдено более наглядного способа и схемы объяснения явлений, связанных с индукцией и электро-механическими действиями, чем концепция фарадеевских линий.

Из диска Араго Фарадей сделал новый источник электричества. Заставив вращаться алюминиевый или медный диск между полюсами магнита, он наложил на ось диска и на его периметр щетки. Таким образом, была сконструирована электрическая машина, получившая позднее название униполярного генератора.

Фарадей исследует различные виды электричества (животное, гальваническое, статическое, магнитное, термоэлектричество) и, доказывая их качественную тождественность, открывает закон электролиза. При этом электролиз служил первоначально лишь доказательством того, что все виды электричества проявляются в одинаковых действиях.

Исследования статического электричества и явления электростатической индукции привели Фарадея к формированию представлений о диэлектриках, к исследованиям разряда в газах. Дальнейшее исследование взаимодействий и взаимопревращения сил привело к открытию магнитного вращения плоскости поляризации света, диамагнетизма парамагнетизма. Для характеристики прозорливости Фарадея, его умения мысленным взором проникнуть вглубь сложнейших физических явлений важно отметить, что еще в 1832 г. он рискнул предположить, что электромагнитные процессы имеют волновой характер, причем магнитные колебания и электрическая индукция распространяется с конечной скоростью. Один из величайших ученых всех времен и народов, Фарадей был человеком исключительной скромности и высоких нравственных принципов. Ему были чужды тщеславие и забота о материальном благополучии, он с

исключительной сердечностью относился к представителям того класса, выходцем из которого он был сам.

Вопросы для самоконтроля

1. С каким наиболее значительным и известным открытием связывают имя М. Фарадея?
2. Какие исследования в области электричества положили начало работам Фарадея?
3. С какого устройства правомерно начать именно историю электрических машин вообще и электродвигателя в частности?
4. Какие работы параллельно с Фарадеем проводил Джозеф Генри?
5. Чем закончилась первая серия опытов Фарадея?
6. Какое явление иллюстрировала вторая серия опытов Фарадея?
7. Какие явления были объединены термином «электромагнитная индукция»?
8. Что представляет собой явление, получившее тогда название магнетизма вращения?
9. Какая машина получила название униполярного генератора?
10. К каким еще открытиям привели Фарадея исследования статического электричества и явления электростатической индукции?

3.2. Начальный период развития электрических двигателей и генераторов

История развития техники знает немало сложных и острых моментов, воспринимавшихся как кризисы, выход из которых сопровождался трудными и долгими усилиями ученых, изобретателей и организаторов производства. К числу таких событий можно отнести электрический кризис XVII–XVIII столетий, когда водяное колесо, хорошо послужившее прогрессу человечеству в эпоху мануфактур, стало сдерживающим фактором дальнейшего развития капиталистического производства, ограничивая мощность и масштабы механического привода. Пришедший на смену ранней гидроэнергетике его величество пар, перевернувший промышленное производство в XVIII в., породил мощную и быстро развивающуюся теплоэнергетику с паровыми котлами и машинами.

В начальный период развития электродвигателей их изобретателям приходилось вступать в дискуссии по такому поводу: так как для производства электроэнергии с помощью электромагнитных генераторов все равно необходим первичный двигатель, то не целесообразнее ли приводить в действие станки непосредственно от парового двигателя, не теряя напрасно энергию при ее многоступенчатых преобразованиях? Аргументы в пользу индивидуального привода и транспорта электроэнергии на большие расстояния появились только в последней четверти XIX в., когда назрел новый энергетический кризис, связанный с ограниченными

возможностями центрального теплового двигателя. Выйти из этого кризиса позволили электрические машины, которые за несколько десятилетий совершили новый переворот в промышленном производстве. Важнейшими научными предпосылками электромеханики послужили достижения в области электродинамики и открытие электромагнитной индукции. Свою положительную роль при разработке первых конструкций электрических машин и электромагнитных устройств сыграл и опыт конструирования машин и механизмов доэлектрического периода. Первоначально развитие электрических генераторов и электрических двигателей шло раздельными путями, что вполне соответствовало состоянию науки об электричестве и магнетизме того периода: принцип обратимости электрических машин был открыт только в 30-х гг. XIX в., но его использование в широких масштабах начинается лишь с 70-х гг. XIX в. В связи с этим правомерно рассматривать отдельно историю создания электродвигателя и электрогенератора в период до 1870 г. Поскольку единственным надежным и изученным источником электрической энергии был до середины XIX в. только гальванический элемент, то, естественно, первыми начали развиваться электрические машины постоянного тока.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем состоял электрический кризис XVII–XVIII столетий?
2. Когда появились аргументы в пользу индивидуального привода и транспорта электроэнергии на большие расстояния?
3. Почему первыми начали развиваться машины постоянного тока?

3.3. Развитие электродвигателей

Начальный период развития электродвигателя (1821–1834) тесно связан с созданием физических приборов для демонстрации непрерывного преобразования электрической энергии в механическую и начинается с опыта Фарадея, о котором уже упоминалось ранее. 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 «колесо Барлоу» и являющееся одним из исторических памятников предыстории развития электродвигателя. Оно представляло собой два медных зубчатых колеса, сидящих на одной оси, которые соприкасались с ванночками, заполненными ртутью, и располагались между полюсами подковообразных магнитов. При пропускании тока через колеса они начинали быстро вращаться.

В качестве другого примера 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, который представлял собой желобок с ртутью, образующий кольцо и разделенный перегородкой на две части: концы обмотки вращающегося электромагнита касались ртути. Это был прообраз будущего коллектора. Действительно, в 1836 г. двухпластинчатый коллектор в виде разрезанной вдоль медной трубки предложил английский физик, изобретатель электромагнита Вильям Стерджен (1783–1850). Колесо Барлоу и электродвигатель Риччи не нашли практического применения.

Для первого этапа развития электродвигателя характерным примером иного конструктивного направления может служить прибор американского физика Джозефа Генри. В 1831 г. он опубликовал статью «О качательном движении, производимом магнитным притяжением и отталкиванием», в которой описал построенную им модель электродвигателя. Под полюсами горизонтально расположенного электромагнита, способного совершать качательное движение, вертикально устанавливались постоянные магниты, изменение полярности электромагнита осуществлялось за счет перемены направления тока в его обмотке, для чего использовались два гальванических элемента.

Однако более прогрессивными оказались попытки построить электродвигатель с вращательным движением якоря. Второй этап раннего развития электродвигателей (1834–1860) характеризуется преобладанием конструкции с вращательным движением явнополюсного якоря. Вращающий момент на валу таких двигателей обычно был пульсирующим. Наиболее характерные и существенно важные работы по конструированию электродвигателей этого рода принадлежат петербургскому профессору Б.С. Якоби (1801–1874). Якоби принадлежит к числу иностранных ученых, которые, откликнувшись на приглашение русских университетов и Петербургской академии наук, переехали в Россию и связали с ней всю свою творческую жизнь. Мориц Герман Якоби принял русское имя, прожил 39 лет в России. Якоби заинтересовался электромагнитными вращениями еще в пору своей деятельности в области архитектуры (он был инженером-строителем по образованию). С начала 30-х гг. XIX в. он все более увлекается работами в области электромагнетизма. Состоя в Петербургской академии наук с 1839 г., в 1865 г. он был избран академиком по физике, заменив умершего Э.Х. Ленца.

В 1834 г. Б.С. Якоби послал в Парижскую академию наук сообщение о изобретенной им «магнитной машине». Более полное описание электродвигателя Якоби было опубликовано в 1835 г. Этот двигатель работал по принципу взаимодействия двух комплектов электромагнитов, один из которых располагался на подвижной рамке, другой – на неподвижной. В качестве источника питания электромагнитов применялась батарея галь-

галиванических элементов. Для изменения полярности подвижных электромагнитов использовался коммутатор, который представлял собой оригинальную и глубоко продуманную часть устройства электродвигателя Якоби. Конструктивно он состоял из четырех металлических колец, установленных на валу и изолированных от него. Каждое кольцо имело четыре выреза по одной восьмой части окружности. Вырезы заполнялись изолирующими вкладышами, а каждое кольцо было смещено на 45° по отношению к предыдущему. По окружности кольца скользил рычаг, представляющий собой своеобразную щетку; второй конец рычага был погружен в соответствующий сосуд с ртутью, к которому подводились проводники от батареи. 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, ток в них имел одно и то же направление. Обмотки электромагнитов вращающегося диска были также соединены последовательно, но направление в них с помощью коммутатора изменялось восемь раз за один оборот вала. Следовательно, полярность этих электромагнитов изменялась также восемь раз за один поворот вала, и электромагниты попеременно притягивались или отталкивались электромагнитами неподвижной рамы. Мощность электродвигателя Якоби составляла примерно 15 Вт. В 1838 г. по реке Неве двигался бот, вмещавший в себя 12 пассажиров и приводимый в движение электродвигателем Якоби, это был уже совсем другой двигатель. В нем Якоби использовал принцип объединения многих машин с электромагнитами, имеющими сосредоточенные катушечные обмотки, в один агрегат. В 1837 г. американский техник Т. Девенпорт также построил электродвигатель с непосредственным вращением якоря, в котором взаимодействовали подвижные электромагниты с неподвижными постоянными магнитами. Сравнивая конструкции электродвигателей Якоби и Девенпорта, можно отметить, что принцип действия их одинаков, но двигатель Девенпорта был более компактным благодаря расположению в одной плоскости подвижной и неподвижной частей.

Двигатель Якоби конструкции 1838 г. представлял собой комбинацию 40 небольших электродвигателей, объединенных по 20 штук на двух вертикальных валах. Вращение с вертикальных валов с помощью конических шестерен передавалось на горизонтальный, на котором укреплялись гребные колеса по обеим бортам электрического бота.

Испытания электрического бота показали возможность практически применения электродвигателей, но в то же время обнаружили, что при питании их током от гальванических батарей механическая энергия получалась чрезмерно дорогой. Произведенные опыты, а также теоретические исследования 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. Однако Якоби не мог обнаружить принципиального недостатка двигателей со стержневыми электромагнитом: в этих двигателях происходило постоянное включение и отключение катушек, и магнитное поле то создавалось, то исчезало. Поэтому по логике развития вскоре должны были появиться непрерывные обмотки, которые обеспечивают электромеханические преобразования энергии в установившемся режиме без изменения энергии магнитного поля.

Рассмотренные электродвигатели действовали по принципу взаимного притяжения и отталкивания магнитов или электромагнитов, вращающий момент на валу отличался непостоянством, и в связи с попеременными притяжениями и отталкиваниями стержневых якорей действие таких электродвигателей было пульсирующим. При столь частых и резких изменениях вращающегося момента и при низких технико-экономических показателях применение таких электродвигателей в системах электропривода представлялось малоперспективным.

Некоторые электродвигатели, построенные в 40–60-х гг. XIX в., действовали по принципу вытягивания стального сердечника в соленоид. Получившееся при этом возвратно-поступательное движение преобразовывалось посредством балансира или кривошипно-шатунного механизма во вращательное движение вала, снабженного для равномерности хода маховыми колесами (как у парового двигателя), например, электродвигатель Бурбуза.

Другим примером электродвигателя, обладавшего признаками, характерными для первого этапа и получившего известность, можно назвать конструкцию французского механика и оптика Поля Густава Формана. Этот двигатель работал по принципу притяжения железных пластин электромагнитами, направление тока в которых изменялось коммутатором. В статье Д.А. Лачинова «Электромеханическая работа», публикация которой началась в первом номере первого русского электротехнического журнала «Электричество» (1880) приводятся следующие данные о двигателе Формана, демонстрировавшегося на Всемирной выставке в Париже (1867): мощность – 1 л.с; масса – 47 пудов (769 кг); КПД – 22%. Новый третий этап в развитии электродвигателей постоянного тока связан с разработкой конструкций, содержащих непрерывную обмотку на якоре. Конструктивно якорь выполнялся сначала в виде кольца или полога цилиндра с обмоткой кольцевого типа, когда провод при намотке пропускаться через внутреннюю полость, затем стали выполнять цилиндрические сердечники с обмоткой барабанного типа, когда провод размещался только на наружных поверхностях сердечника. В обоих случаях линии магнитного потока входили в сердечник якоря перпендикулярно поверхности цилиндра, а не в торец, как при стержневом якоре. Первым

конструкцию кольцевого якоря предложил в 1860 г. студент (впоследствии профессор) Пизанского университета Антонио Пачинотти (1841–1912). Вращающий момент в электродвигателе Пачинотти был практически постоянным. Габариты двигателя были 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 добавить удобную схему возбуждения и коллектор, по существу, современного типа. В 1863 г. Пачинотти опубликовал сведения о конструкции своего двигателя, но на эту публикацию не было обращено достаточного внимания, и изобретение было на время забыто. Несмотря на большой интерес с принципиальной точки зрения, двигатель не получил распространения, т.к. по-прежнему отсутствовал экономичный генератор электрической энергии. Идея кольцевого якоря была возрождена примерно через десять лет З.Т. Граммом в конструкции электромашинного генератора. Особо следует остановиться на открытии принципа обратимости электрических машин. Сама логика исследований Б.С. Якоби, относящихся к его электродвигателю, должна была подтолкнуть его в самом начале 30-х гг. XIX в. к этому открытию. Однако право первооткрывателя важнейшего принципа электрической машины – принципа обратимости – бесспорно принадлежит Э.Х. Ленцу (1804–1865). В докладе Петербургской академии наук, сделанном 19 ноября 1833 г. и опубликованном в 1834 г., этот принцип представляется в виде следствия из сформулированного закона, обесмертившего имя великого физика – закона Ленца. Более четко принцип обратимости был еще раз сформулирован Э.Х. Ленцем в статье «О некоторых опытах из области гальванизма» в следующем виде: «Каждый электромагнитный опыт может быть обращен таким образом, что он приведет к соответствующему магнитоэлектрическому опыту. Для этого нужно только сообщить проводнику гальванического тока каким-либо иным способом то движение, которое он совершает в случае электромагнитного опыта, и тогда в нем возникает ток направления, противоположного направлению тока в электромагнитном опыте».

Вопросы для самоконтроля

1. *Что представляло собой «колесо Барлоу»?*
2. *В чем суть электродвигателя Риччи?*
3. *Что представляла собой модель электродвигателя Джозефа Генри?*
4. *Какие работы параллельно с Фарадеем проводил Джозеф Генри?*
5. *Чем характеризуется второй этап раннего развития электродвигателей?*
6. *Опишите принцип действия «магнитной машины» Б.С. Якоби.*
7. *Какое практическое применение нашла «магнитная машина» Б.С. Якоби?*

8. Какой принципиальный недостаток двигателей со стержневыми электромагнитами Якоби не мог обнаружить?

9. Каков был принцип действия двигателя Поля Густава Формана?

10. Дайте характеристику третьего этапа в развитии электродвигателей постоянного тока.

3.4. Развитие электрических генераторов

Громоздкие и малоэффективные гальванические батареи сводили на нет усилия по конструированию и изготовлению электродвигателей. Сын знаменитого изобретателя Роберт Стефенсон подсчитал в 1862 г., что энергия гальванического электричества стоила в два раза дороже ручной работы. Назрела необходимость в создании более экономичного и мощного источника электроэнергии.

Простейшим гальваническим элементом 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. французский ученый А.С. Беккерель (открывший явление поляризации) создал более совершенную конструкцию элемента с двумя жидкостями. В 1836 г. Даниэль создал элемент с деполяризатором, который был назван постоянным элементом. По мере усовершенствования эти элементы получили широкое распространение. Другим направлением в области создания электрохимических источников тока было конструирование электрохимических аккумуляторов или «вторичных элементов», как они долгое время назывались. Принципиально возможность аккумулирования электроэнергии была установлена еще в начале XIX в., но только в 1854 г. немецкий ученый В. Зинстеден открыл способ аккумулирования. 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 гг. XIX в. значительное распространение, проблема экономичного источника электроэнергии была решена только созданием совершенной конструкции электромашинного генератора. Развитие электрических машин наглядно иллюстрирует характерную закономерность в развитии техники вообще. Эта закономерность проявляется в следующем: если развитие какой-либо техники тормозится недостаточным уровнем другой отрасли техники или области науки, то развитие последней ускоряется требованиями первой. Так, если отсутствие экономичного генератора тока сдерживало расширение практических применений электричества, то это обстоятельство стимулировало и ускоряло работу по созданию более совершенной конструкции генератора. В развитии электрогенераторов постоянного тока можно выделить четыре этапа.

Первый этап (1831–1851) характеризуется созданием электрогенераторов 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 применение в первом униполярном генераторе – диске Фарадея. Один из первых шагов в истории генератора несет в себе тайну, оставшуюся неразгаданной. Дело в том, что имя изобретателя, сделавшего первый шаг, осталось неизвестным. 26 июля 1832 г. Фарадей получил анонимное письмо, в котором автор письма описал опыт, при котором впервые удалось получить химическое разложение электрическим током. Это письмо Фарадей направил в редакцию известного лондонского научного журнала для опубликования. Письмо было подписано двумя латинскими буквами «PM». Эта машина представляла собой синхронный генератор (многополюсный), т.е. была генератором переменного тока. Письмо PM привлекло к проблеме генератора внимание многих ученых. Прочел публикацию и сам PM. В марте 1833 г. он обратился в редакцию журнала с благодарностью Фарадею за публикацию письма и описанием усовершенствований в машине. Генератор PM конструктивно был выполнен в виде деревянного диска, укрепленного на оси, приводимой в движение рукояткой. Катушки с железными сердечниками крепились к неподвижному стальному кольцу с добавочными обмотками, замыкающему магнитную цепь сердечников. Фарадей также способствовал опубликованию в журнале письма Сальватора даль Негро (апрель 1832 г.), работавшего в городе Падуа (Италия). В этом письме был описан генератор с возвратно-поступательным движением блока из четырех постоянных магнитов, полюса которых входили в соединенные по определенной схеме катушки. Это также был генератор переменного тока. Однако переменный ток в то время не мог найти себе потребителя, т.к. для всех практических применений электричества (минная электротехника, электрохимия, только что зарождавшаяся 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 различные коммутационные устройства.

Впервые приспособление для выпрямления тока в попеременнополюсной машине (в отличие от униполярной машины Фарадея, которая не нуждалась в устройстве для выпрямления тока, т.к. давала непосредственно постоянный ток) было применено в 1832 г. в генераторе братьев Пиксии. Изобретение представлялось тогда настолько важным, что сообщения о нем были дважды сделаны в Парижской академии наук. Генератор братьев Пиксии конструктивно был выполнен так: при вращении подковообразного постоянного магнита наводилась переменная ЭДС в двух неподвижных катушках со стальным сердечником. Магнит приво-

дился во вращение посредством рукоятки и конической передачи. Концы последовательно соединенных катушек выводились к зажимам барабанного коммутатора. Главное, что считал нужным отметить Ампер в докладе о генераторе Пиксии, это счастливая мысль по поводу выпрямления тока. Пластинчатый барабан генератора с прижимающимися к амальгамированным поверхностям пластин, подпружиненными медными или бронзовыми щетками, стал основой коммутирующих устройств для всех последующих конструкций генераторов постоянного тока. С машиной Пиксии работал Ленц и именно на этой машине он в 1838 г. демонстрировал принцип обратимости. Недостатком машин РМ и Пиксии являлась необходимость вращения в них более или менее тяжелых постоянных магнитов. Целесообразнее оказалось сделать магниты неподвижными и 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.

Первым генератором, получившим практическое применение, был магнитоэлектрический генератор Б.С. Якоби. Занимаясь усовершенствованием методов электрического взрывания мин, он построил в 1842 г. генератор, названный им «магнитоэлектрической батареей». При вращении катушек зубчатой передачей в поле постоянных магнитов в них наводилась ЭДС. На валу генератора имелось коммутирующее устройство 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 увеличения мощности соединять несколько элементарных машин в одну. Наибольшее распространение в лабораторной практике 45–50-х гг. XIX в. получил магнитоэлектрический генератор немецкого электротехника Э. Штерера с тремя вращающимися постоянными магнитами (1843).

Известный толчок к построению более мощных магнитоэлектрических генераторов дали дуговые лампы с регуляторами, получившее распространение 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. Работы Нолле были продолжены Ван Мальдереном (Франция) и Холмсом (Англия), и к 1856 г. машина получила свое конструктивное завершение. Для производства таких генераторов в Париже была организована электропромышленная компания «Альянс» (отсюда и произошло назва-

ние новой машины). В генераторе «Альянс» на чугунной станине были укреплены в несколько рядов подковообразные магниты, расположенные по окружности и радиально по отношению к валу. В промежутках между рядами магнитов устанавливались на валу диски с большим числом катушек-якорей. На валу генератора крепился коллектор с 16-ю металлическими пластинами, изолированными друг от друга и вала машины. В качестве коллекторных щеток служили специальные ролики. В машине впервые было предусмотрено устройство для смещения роликов с нейтрالي. В зависимости от нагрузки перемещение роликовых токоприемников 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 изменялась ЭДС. Вследствие этого, генератор мог давать либо больший 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 использовался паровой двигатель мощностью 6–10 л.с. Масса шестидисковой машины «Альянс» доходила до 4 т, причем только на долю магнитов приходилось более 1 т. Генератор «Альянс» нагляднее, чем другие, меньших размеров, машины, показал недостатки, присущие вообще магнитоэлектрическим машинам. Материалы и технология изготовления постоянных магнитов были еще несовершенны. Под действием реакции якоря, в результате естественного старения и возможных вибраций магниты быстро размагничивались, в связи с чем уменьшались ЭДС генератора и его мощность. Во всех этих машинах применялись стержневые якоря, имевшие многослойную обмотку. При работе они сильно нагревались вследствие плохого отвода тепла, что приводило к разрушению изоляции. Масса и габариты магнитоэлектрических генераторов, несмотря на их небольшую мощность, были весьма значительными, и крупные машины были сравнительно дорогими. Принципиальным недостатком машины с явнополюсным якорем явилось то, что она давала резко пульсирующий ток. Одну из возможностей сгладить ток магнитоэлектрического генератора указал в 1841 г. английский физик Уитстон Чарльз (1802–1875). Он предложил комбинировать в одном агрегате несколько элементарных магнитоэлектрических генераторов, оси катушек (якорей) которых относительно осей симметрии магнитов были сдвинуты. В этом случае оказывались сдвинуты относительно друг друга фазы индуцированных ЭДС и их суммирование приводило к более гладкой кривой общего тока.

Второй этап в развитии электрического генератора постоянного тока условно можно обозначить периодом с 1851 по 1867 гг. Этот этап характеризуется преимущественным конструированием генераторов с незави-

симым возбуждением, т.е. с возбуждением электромагнитов от независимого постороннего источника тока, что способствовало значительному улучшению постоянства работы генераторов и уменьшению их относительной массы. Первое четкое и обоснованное указание на целесообразность замены постоянных магнитов электромагнитами дал в 1851 г. немецкий врач Вильгельм Зинстеден, увлеченный исследованиями в области электрических машин и внесший значительный вклад в теорию электромагнетизма и электрических машин. Однако на его предложение некоторое время не обращали внимания. Следующим в начале 50-х гг. XIX в., независимо от Зинстедена, начал применять электромагниты для возбуждения поля, датский изобретатель Сёрен Хиорт, но его идеи и конструкции были настолько необычны и неожиданны, что тоже не привлекли к себе должного внимания и были надолго забыты.

В качестве характерного примера генератора с электромагнитами, обмотки которых питались от независимого источника, может быть отмечен генератор англичанина Г. Уайльда (1863). В этом генераторе для питания электромагнита был приспособлен отдельный возбудитель – небольшой магнитоэлектрический генератор. Вместо обычно применявшегося стержневого якоря Уайльд использовал предложенный в 1856 г. немецким электротехником и предпринимателем Вернером Сименсом якорь с сердечником двутаврового сечения, который является разновидностью явнополюсного якоря. Этот якорь имел форму вала с продольными выточками, в которые укладывалась обмотка. Машина с таким якорем обладала меньшим магнитным рассеянием, чем со стержневым, но якорь имел многослойную обмотку с плохим теплоотводом, сильно нагревался и тем самым ограничивал мощность установки. Машина Уайльда подготовила конструкторскую мысль к созданию генераторов с самовозбуждением.

Началом третьего этапа в развитии генераторов постоянного тока условно можно считать 1867 г., когда почти одновременно в разных странах был установлен принцип самовозбуждения. 17 января 1867 г. крупный немецкий ученый, изобретатель и промышленник Вернер Сименс (1816–1892) представил в Берлинскую академию наук доклад, в котором изложил сущность принципа самовозбуждения: «Однако того небольшого количества магнетизма, которое остается даже в самом мягком железе, достаточно, чтобы при возобновлении вращения снова получить в замкнутой цепи непрерывное возрастание тока. Следовательно, достаточно один раз пропустить ток в цепь обмотке неподвижного магнита, чтобы сделать прибор способным давать ток при каждом возобновлении вращения». Сименс назвал принцип самовозбуждения динамоэлектрическим, а самовозбуждающийся генератор стал с тех пор называться динамомашинной. Впрочем, динамомашинной постепенно начали называть любой машинный генератор постоянного тока. От имени Варнера Сименса его брат Вильгельм Сименс 14 февраля 1867 г. выступил с изложением сути

открытия принципа самовозбуждения в Лондонском королевском обществе. Но на том же заседании, часом или двумя позже, выступил также известный английский физик Чарльз Уитстон – автор многих работ в области электромагнетизма. В докладе Уитстона содержалось описание принципа самовозбуждения, и давался анализ схем соединения самовозбуждающихся генераторов. Вскоре обнаружилось, что 24 декабря 1866 г. в Англии запатентовали самовозбуждающийся генератор телеграфные инженеры Корнелий и Самюэль Варлей. Более тщательное исследование показало, что 20 июля того же года в редакцию журнала «Engineer» направил письмо Д. Мюррей, в котором сообщил о том, что, совершенствуя генератор Уайльда, он устранил возбудитель и получил самовозбуждение машины.

Новые исторические исследования привели к имени судебного чиновника Сёрена Хиорта (1801–1870), который в порядке самообразования слушал лекции Эрстеда в Копенгагенском политехническом институте. Перейдя работать на железную дорогу, Хиорт попытался применить там электрические машины. В мае 1852 г. в своем сообщении научному обществу в Копенгагене он описал принцип самовозбуждения и продемонстрировал чертежи машины. В 1854 и 1855 гг. Хиорт получил английские патенты на машины с самовозбуждением.

В 1856 г. венгерский физик А. 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 саморасширения магнитного поля. Для возникновения этого процесса нет необходимости в установке постоянных магнитов, а вполне достаточно остаточного магнетизма. В 1861 г. он построил самовозбуждающийся генератор.

Находясь и другие претенденты на открытия принципа самовозбуждения. Например, в американском словаре научных биографий утверждается, что первым был ирландский физик и священник Николас Каллан, который сделал свое открытие еще в 1838 г. Работы Хиорта и Йедлика были, по-видимому, несколько преждевременными и, кроме того, изобретатели не располагали необходимыми средствами для промышленного изготовления машин. На их идеи не было обращено достаточного внимания. Иное положение было у В. Сименса: являясь главой фирмы, со временем завоевавшей позиции ведущего мирового электротехнического концерна, он открыл широкую дорогу для производства динамомаши.

Событием, революционизировавшим развитие электрических машин, положившим начало промышленной электротехнике, явилось объединение принципа самовозбуждения с конструкцией кольцевого якоря. Разработка самовозбуждающихся генераторов с кольцевыми системами составила основное содержание четвертого этапа в развитии электрических генераторов.

Бывший столяр фирмы «Альянс» Зенаб Т. Грамм (1826–1901), занимаясь изготовлением электрических машин, стал одним из самых известных

французских специалистов в области электромашиностроения и электрического освещения. В июне 1870 г. он получил патент, а в 1871 г. представил доклад в Парижскую академию наук, в котором содержалось описание самовозбуждающегося (в общем случае многополюсного) генератора с кольцевым якорем. На гладкий железный кольцеобразный сердечник наматывалась замкнутая сама на себя обмотка (позднее такую обмотку стали называть граммовской. От равноудаленных точек этой обмотки шли отпайки к коллекторным пластинам. Якорь приводился во вращение через приводной шкив. Обмотка возбуждения была включена последовательно с обмоткой якоря.

А. Пачинотти прочел в 1871 г. в парижском журнале сообщение об изобретении Грамма и направил в редакцию этого журнала очень корректное письмо, в котором устанавливал свой приоритет на кольцевой якорь (вращающийся электромагнит с коммутатором и возбуждаемый полюсами неподвижного электромагнита был построен им уже в 1860 г.). Машина Пачинотти хранится в кабинете технологической физики в университете г. Пизы (Италия). Якорь Пачинотти был лучше граммовского, т.к. он был зубчатым, следовательно, в машине Пачинотти был меньше немагнитный зазор между якорем и полюсами. Конфигурация магнитопровода была еще несовершенной, но улучшения этого рода могли последовать только в 80-х гг. XIX в., после того как были разработаны методы расчета магнитной цепи.

Позднее Грамм предложил еще несколько конструкций самовозбуждающихся машин, различных по внешнему виду и мощности, но принципиальных изменений в свою машину он не вносил. Генератор Грамма оказался весьма экономичным источником электроэнергии, позволявший получать значительные мощности при высоком КПД и сравнительно малых габаритах и массе (имел массу на 1 кВт примерно в 6 раз меньшую, чем генератор с постоянными магнитами). Очевидные преимущества генератора Грамма способствовали тому, что он быстро вытеснил другие типа генераторов и получил очень широкое распространение. Машина Грамма использовалась как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Таким образом, в начале 70-х гг. XIX в. обе линии развития электрических машин (генератора и двигателя) объединились. Машина Грамма представляла собой машину постоянного тока современного вида, однако она нуждалась в усовершенствованиях.

Вопросы для самоконтроля

- 1. В чем заключался основной недостаток электрохимических источников тока?*
- 2. Какими событиями характеризовался первый этап развития генераторов постоянного тока?*
- 3. Что представлял собой генератор РМ?*

4. Почему генераторы переменного тока на данном этапе не нашли применения?

5. Что представлял собой генератор братьев Пиксии?

6. Что представляла собой магнитоэлектрическая батарея Б.С Якоби?

7. Каково было конструктивное исполнение и принцип действия генератора «Альянс»?

8. Какие недостатки, присущие магнитоэлектрическим машинам, показал генератор «Альянс»?

9. Охарактеризуйте второй этап в развитии электрического генератора постоянного тока.

10. В чем суть принципа самовозбуждения, открытие которого повлияло на третий этап в развитии электрического генератора постоянного тока?

11. Назовите событие, революционизировавшее развитие электрических машин и положившее начало промышленной электротехнике.

12. Каков вклад в развитие генераторов постоянного тока Зенаб ТГрамма и А. Пачинотти?

3.5. Развитие неэнергетических применений электричества

Начало практическому использованию электричества положили телеграфия, телефония, электрическое взрывание мин, дистанционное управление и другие неэнергетические применения, не требующие значительных затрат электроэнергии, в которых она используется как вспомогательное средство для передачи сигналов (для них не являлось препятствием отсутствие экономичных генераторов электроэнергии). Расширение неэнергетических применений электричества сыграло значительную роль в развитии электротехники вообще, т.к. 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 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 синхронной связи, распределителей, исполнительных устройств.

Первым электротехническим устройством, предназначенным для широкого практического применения, 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 Павлом Львовичем Шиллин-

гом (1786–1837) в 1828–1832 гг. Этот телеграф был основан на визуальном приеме кодовых знаков и явился исходной конструкцией для последующих телеграфов. Шиллингом впервые был применен кодированный сигнал, чем было положено начало кодоимпульсному методу, получившему распространение в современной телемеханике. В процессе разработки телеграфной линии Петергоф – Кронштадт (1837.) Шиллингом был применен каучук для изолирования подводного кабеля, а также указана возможность использования воды или земли в качестве обратного провода. На суше телеграфная линия была выполнена Шиллингом проводами, закрепленными на телеграфных столбах. Из всех предложенных после Шиллинга конструкций электромагнитных телеграфов наиболее широкое применение получил телеграф американца С. Морзе (1844). Заслуживает внимание 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 – Якоби, 1855 – Д. Юз). Среди первых применений электричества следует отметить использование его в военном деле, и прежде всего для воспламенения пороховых зарядов. Эта проблема была впервые успешно разрешена в 1812 г. Шиллингом, осуществившим на реке Неве опыт по электрическому взрыванию подводных мин. Дальнейшие работы в области минной электротехники велись в направлении совершенствования электрических запалов, создании специальных электрических машин и приборов для их питания («взрывные» машинки, индукционные катушки) и автоматизации самого процесса взрывания мин. Создание этих приборов положило начало батарейной и генераторной системам зажигания с применением индукционной катушки (разработана такая катушка Б.С. Якоби в начале 40-х гг. XIX в.). Многими другими отечественными и зарубежными военными электротехниками были разработаны разнообразные электроавтоматические приборы, обеспечивающие взрыв мины при ее соприкосновении с корпусом корабля.

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

Основным элементом 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 электрических цепей в телеграфах и минных устройствах. В середине XIX в. разрабатываются электроавтоматические устройства для регистрации малых промежутков времени, контроля некоторых производственных процессов, создаётся ряд схем дистанционного управления. Одним из первых наиболее совершенных регистрирующих устройств была разработанная в 1842–1845 гг. электробаллистическая установка русского военного электротехника К.И. Константинова (1819–1871) с электромагнитным хроноскопом (прибором для сравнения показаний двух часов и для точного измерения коротких интервалов времени, позволяющим отсчитывать интервалы времени с точностью до нескольких десятитысячных долей секунды) и автоматическим переключателем цепей (прототипа распределителя – элемента современных автоматических и телемеханических установок). С помощью такой установки Константинову удалось осуществлять измерения малых промежутков времени с точностью до 0,00006 с. Приборы, созданные им, автоматически сигнализировали и регистрировали момент прохождения снаряда сквозь щит при артиллерийских стрельбах.

Самым распространенным электроавтоматическим устройством в 50–70-х гг. XIX в. были электромагнитные регуляторы в дуговых электрических лампах, обеспечивающие автоматическое регулирование расстояния между электродами дуги. До появления свеч Яблочкова в 1876 г. электромагнитный регулятор являлся наиболее важным конструктивным узлом дуговых ламп, без которого они не могли работать.

Одной из первых по времени (1846) конструкций дуговых ламп с электромагнитным регулятором была лампа француза Аршро. Эта лампа, в частности, применялась для освещения площади перед адмиралтейством в Петербурге, однако опыты с ней были признаны тогда неудачными. Большую известность получило применение десяти дуговых ламп с регуляторами Шпаковского в 1856 г. при иллюминации на Лефортовском плацу в Москве во время торжеств по случаю коронации Александра Второго. В регуляторе Шпаковского применялось комбинированное (электромагнитное и механическое) регулирование. По характеру электрической схемы питания регуляторы разделяли на три группы: регуляторы с последовательным и параллельным питанием, более современные дифференциальные регуляторы были разработаны В.Н. Чиколевым (1845–1898) в 1869–1879 гг. В частности, им впервые в мировой практике применен метод электромашинного регулирования.

В 60–70-х гг. XIX в. в связи с развитием телефонии создаются специальные автоматические устройства: искатели, коммутаторы и другие. Ведется разработка электромеханических, электрохимических, электромагнитных и электромашинных устройств. В рассматриваемый период было положено начало энергетическим применениям электричества, в частности, начинает развиваться промышленная электрохимия. Развитие промышленной электрохимии в большей мере обязано открытию Б.С. Якоби в 1838 г. явления гальванопластики (получение точных металлических копий методом электролитического осаждения металла на металлическом или неметаллическом оригинале), которая позволила с помощью электролиза получать точные копии с поверхности предметов и сразу же нашла практическое применение, например, в полиграфии, медальерном деле и т.п. Она явилась предпосылкой созданного Якоби метода нанесения на поверхность предмета металлических покрытий – гальваностегии. В середине XIX в. в России и за границей возникли крупные гальванотехнические предприятия, на многих заводах были созданы гальванические мастерские.

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

Исследования в области электрических и магнитных явлений и расширение их практического применения вызвали потребность разработки методов измерений основных электрических величин и создания электроизмерительных приборов. Принцип действия первых электроизмерительных приборов был основан на отклонении магнитной стрелки электрическим током, поэтому они являлись лишь индикаторами тока. Первым из них был мультипликатор австрийского физика И.Х. Швейгтера, созданный в 1820 г. Он представлял собой рамку, состоящую из нескольких витков проволоки, внутри рамки помещалась магнитная стрелка. В первых стрелочных приборах, служивших для измерения тока, синус или тангенс угла отклонения стрелки был пропорционален величине тока, поэтому такие приборы назывались соответственно синус- и тангенс-гальванометрами. Первая попытка отградуировать гальванометр сделана в 1832 г. Б.С. Якоби. Уже в первой половине XIX в. создаются более чувствительные и точные гальванометры, электродинамометр, астатический гальванометр и т.п. Были разработаны баллистический (Э.Х. Ленц, 1832) и компенсационный (немецкий физик Поггендорф, 1841) методы измерений, мостовая измерительная схема (Ч. Уатсон, 1843) и др. В 40–60-х гг. XIX в. появляются первые конструкции реостатов (вольтагометр Якоби), реохордов (Поггендорф), магазинов сопротивлений и других подобных устройств. В течение всей второй половины XIX в. обсуждался вопрос об электрических единицах и

эталонов. Необходимость в установлении международных единиц все более возрастала. Большую работу в этом направлении провела Британская ассоциация для содействия развитию наук, образовавшая в 1861 г. специальный комитет для разработки эталона единицы измерения сопротивления. Этот комитет предложил название единицы «Ом», «Вольт», «Фарада».

Международный конгресс электриков, состоявшийся в 1881 г. в Париже, рекомендовал для применения абсолютную электромагнитную систему и ввел названия единиц «Ампер» и «Кулон». Окончательное решение вопроса о единицах и эталонах получили на Чикагском электротехническом конгрессе в 1893 г.

Вопросы для самоконтроля

- 1. Как было положено начало практическому неэлектрическому применению электроэнергии?*
- 2. Какое первое электротехническое устройство предназначалось для широкого практического применения?*
- 3. Кем был разработан первый практически пригодный электромагнитный телеграф?*
- 4. Как была выполнена телеграфная линия Петергоф – Кронштадт?*
- 5. В чем суть принципа электрической синхронно-синфазной связи, разработанного Б.С. Якоби и лежащего в основе современной техники дистанционной передачи и следящего электропривода?*
- 6. Как использовалось электричество в военном деле?*
- 7. Каким образом использовалась электроэнергия для целей автоматического контроля, управления и регулирования?*
- 8. Что представляла собой электробаллистическая установка русского военного электротехника К.И. Константинова?*
- 9. Дайте характеристику электромагнитных регуляторов осветительных установок.*
- 10. Как велись разработки методов измерений основных электрических величин и создания электроизмерительных приборов?*

3.6 Становление основ теории электрических цепей и электромагнетизма

После первых количественных и качественных исследований в 20-е гг. XIX в. стали формироваться физические основы теории электрических токов. Самый большой вклад здесь был внесен работами Ампера, Ома, Кирхгофа, заложившими основы расчетов электрических цепей. Еще до Кирхгофа разными учеными находились токи в разветвленных цепях, но только Кирхгофу в 1845–1847 гг. удалось сформулировать известные топологические законы, названные его именем. Законы Кирхгофа легли в основу всех последующих методов расчета электрических цепей.

Английский физик Ч. Уитстон (1802–1875) в связи с работами по усовершенствованию телеграфа искал способы измерения сопротивлений. В результате он создал знаменитый «мостик Уитстона», решающим достоинством которого является независимость состояния равновесия от напряжения источника питания. В 1840 г. он показывал свое устройство Якоби, а в 1843 г. дал описание своего «мостика» в статье. Для измерения сопротивления одного из плечей мостика Уитстон применил регулируемые резисторы, которые он назвал реостатами. Позднее (в 1860 г.) Вернер Сименс сконструировал магазин сопротивлений. Один из крупнейших немецких ученых Г.Л. Гельмгольц (1821–1894) ввел в 1853 г. в теорию цепей известный ранее в физике принцип суперпозиции (результатирующий эффект от нескольких независимых воздействий представляет собой сумму эффектов, вызываемых каждым воздействием в отдельности), на основе которого были построены важные теоремы электрических цепей, включая теорему об эквивалентном источнике (Гельмгольца–Тевенена). Гельмгольц же впервые получил уравнение переходного процесса в цепи при ее подключении к источнику, рассмотрел постоянные времени электрической цепи. Уильям Томсон (лорд Кельвин) в 1853 г. дал расчет колебательного процесса и установил связь между частотой собственных колебаний, индуктивностью и емкостью.

Максвеллом был разработан метод контурных токов, доказана теорема взаимности. Постепенно формировался практически весь арсенал методов расчета (включая эквивалентные преобразования) цепей постоянного тока.

После открытия электромагнитной индукции внимание ученых в значительной степени переключилось с гальванических токов, когда главными объектами исследований были сами гальванические элементы, процессы электролиза, на индукционные токи, когда наибольший интерес стали вызывать явления электромагнетизма. Здесь особая роль принадлежит выдающемуся русскому физiku Э.Х. Ленцу. Он учился в своем родном городе Тарту (бывший город Юрьев, затем Дерпт), и еще студентом в качестве физика участвовал в кругосветном путешествии под командой О.Е. Коцебу, стал академиком Петербургской академии наук, заведующим кафедрой физики, затем деканом физико-математического факультета, а в 1863 г. был избран ректором Петербургского университета. В своем докладе Петербургской академии наук 29 ноября 1833 г. Э.Х. Ленц дал свою знаменитую формулировку закона, названного его именем: если металлический проводник движется поблизости от гальванического тока или магнита, то в нем возбуждается гальванический ток такого направления, что он мог бы обусловить в случае неподвижности данного проводника его перемещение в противоположную сторону, при чем предполагается, что такое перемещение может происходить только в направлении движения или в направлении прямо противоположном».

В этой формулировке заключена и идея принципа обратимости электрических машин, развитая позднее Якоби. Ленц был одним из основоположников теории магнитоэлектрических машин. Ему принадлежит открытие и объяснение явления реакции якоря (1847) и установления необходимости сдвигать щетки с геометрической нейтральной, он впервые изучил смещение фазы тока относительно фазы напряжения (1853), придумал индикатор для изучения формы кривой индуцированного тока (1857) Им было установлено условие режима максимальной полезной мощности источника энергии, когда внутреннее сопротивление источника равно сопротивлению внешней цепи. Широко известна работа Ленца по тепловому действию тока (1842–1843), которая была выполнена независимо от Джеймса Джоуля (1841) и представляла собой настолько обстоятельное исследование, что известному закону было справедливо присвоено имя обоих ученых.

В 1867 г. Максвелл сделал доклад Лондонскому королевскому обществу «О теории поддержания электрических токов механическим путем без применения постоянных магнитов». Это был чисто теоретический труд, охвативший все известные к тому времени сведения об электрических машинах постоянного тока. Seriously продвинули теорию электрических машин введенные в 1879 г. английским электротехником Дж. Гопкинсоном (1849–1898) графические представления о зависимостях в электрических машинах, так называемые характеристики машин (характеристика холостого хода, внешняя характеристика и др.). Им же введено понятие о коэффициенте магнитного рассеяния. В мае 1886 г. Джон и Эдуард Гопкинсоны сделали доклад в Лондонском королевском обществе «Динамоэлектрические машины», в котором содержалась уже вполне законченная, не потерявшая своего значения до нашего времени теория электрических машин постоянного тока. Открытия в области электричества и магнетизма, сделанные в первой половине XIX в., а также практическое применение этих явлений стали предпосылками к важным научным обобщениям, в частности к созданию электромагнитной теории английского физика Максвелла (1831–1879). В 1864 г. он дал определение электромагнитного поля и заложил основы его теории. Заслуга Максвелла состоит в том, что используя накопленный до него обширный экспериментальный материал, он обобщил и развил прогрессивные идеи Фарадея, придав им математическую форму. В своем труде «Трактат об электричестве и магнетизме» (1873) Максвелл изложил основы разработанной им теории поля, являющейся краеугольным камнем современного учения об электромагнетизме. Важнейшие результаты своих исследований Максвелл сформулировал в виде знаменитых уравнений, получивших его имя. Максвелл обобщил закон электромагнитной индукции, распространив его на произвольный контур в любой среде. Он ввел понятие об электрическом смещении и токах смещения, установил принцип замк-

нутости тока. Одним из важнейших выводов Максвелла является утверждение о том, что электрическое и магнитное 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. Позднее немецкий физик Г. Герц экспериментально доказал существование электромагнитных волн, а русский физик П.Н. Лебедев открыл световое давление и определил из опытов его значение, совпадающее с вычисленным значением по теории Максвелла.

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

Вопросы для самоконтроля

1. Каков вклад Кирхгофа в формирование физических основ теории электрических токов?

2. Что представляет собой знаменитый «мостик Уитстона»?

3. Какова роль Э.Х. Ленца в формировании теории электромагнетизма?

4. Какова роль Максвелла в формировании теории электромагнетизма?

5. Какой ученый экспериментально доказал существование электромагнитных волн?

Тема 4. СТАНОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ КАК САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ ТЕХНИКИ

4.1. Развитие электрического освещения

Электрические устройства не выходили за пределы лабораторий, пока не было достаточно мощного и экономичного источника электроэнергии и массового потребителя. К 1870 г. такой источник был создан. Следующие за этой датой 15–20 лет прошли как годы зарождения основных электротехнических устройств массового и бытового назначения, как годы становления новой отрасли техники. Первым и по настоящему массовым потребителем электроэнергии явилась система электрического освещения. Электрическая лампа и по нынешний день осталась самым распространенным электротехническим устройством.

В течение первой половины XIX в. господствующее положение занимало газовое освещение, имевшее значительные 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 меньше удовлетворяло требованиям практики, т.к. было опасно в пожарном отношении, вредно для здоровья, а сила света отдельной горелки была мала. Особенно недостатки газового освещения стали сказываться на крупных предприятиях с большим числом рабочих, занятых на производстве по 12–14 часов в сутки, вызывая резкое снижение производительности труда. Поэтому вполне своевременными, отвечавшими социальному заказу общества были попытки создать электрические источники света, решительно вытеснившие вскоре все остальные источники.

Развитие электрического освещения шло по двум направлениям: конструирование дуговых ламп и ламп накаливания. История электрического освещения начинается с опытов Петрова В.В. (1802), которыми было установлено, что электрическую дугу можно использовать для освещения «темных покоев». Тогда же, в 1802 г., Деви в Англии демонстрировал накал проводника током. Электрическая дуга представляла собой в буквальном смысле яркое проявление электрического тока и в первой половине XIX в. она часто демонстрировалась в лабораториях и на лекциях об электричестве. Принципиальными недостатками дугового источника являются: открытое пламя (пожароопасность), огромная сила света и необходимость регулирования дугового промежутка по мере сгорания углей.

В 1844 г. французский физик Жан Бернар Фуко (1819–1868), именем которого названы открытые им вихревые токи, заменил электроды из древесного угля электродами из ретортного угля, что увеличило продолжительность горения лампы. Регулирование дугового промежутка оставалось еще ручным. Такие лампы могли получить применение лишь в тех случаях, когда требовалось непродолжительное по времени, но интенсивное освещение, например, при подсветке предметного стекла микроскопа, при устройстве сигнализации в маяках или театральных эффектах.

Дальнейшая история дугового электрического освещения связана с изобретениями различных механических и электромагнитных регуляторов. Крупносерийный выпуск дуговых ламп с дифференциальным регулятором начали производить в конце 70-х гг. XIX в. заводы Сименса (с которыми объединились заводы немецкого фабриканта З. Шуккерта), и такая лампа стала продаваться под наименованием «дуговая лампа Сименса». С 80-х гг. XIX в. дифференциальные дуговые лампы стали единственным типом дуговых источников света, которые применялись для освещения улиц, площадей, гаваней, а также для освещения больших помещений производственного или общественного назначения. Они стали обычными источниками света в прожекторной и светопроекционной технике.

Особое место среди дуговых источников света занимает «электрическая свеча» Павла Николаевича Яблочкова (1847–1894), поскольку именно она явилась тем детонатором, который вызвал бурный рост электротехнической промышленности. П.Н. Яблочков был военным инженером, выпускником Главного инженерного училища в Санкт-Петербурге. Окончание им училища совпало по времени с появлением динамомашины, и молодой офицер, заинтересовавшись электротехникой, вскоре поступил в техническое гальваническое заведение, в котором готовились военные электротехники. Желая посвятить себя полностью работам по электротехнике, Яблочков выходит в отставку и занимается исследованиями в созданной им в Москве мастерской физических приборов.

Изобретение было важным, но гениально простым: чтобы избавиться от дорогих регуляторов, нужно просто повернуть уголи из встречного положения в параллельное. Но П.Н. Яблочков всю жизнь был плохим предпринимателем. Его московская мастерская потерпела финансовый крах и ему угрожала долговая тюрьма. Спасая свое изобретение, он срочно переехал в Париж. 23 марта 1876 г. Яблочков получил патент на ставшую знаменитой «электрическую свечу». В этом же году он организовал компанию по производству систем освещения, в которой вел работу в качестве технического руководителя. Первой операцией компании было освещение универсального магазина «Лувр» в Париже, затем ипподрома и, пожалуй, самое эффектное освещение улицы Оперы. Его изобретение совершило триумфальное шествие по всему миру: за Парижем последовало освещение моста Ватерлоо в Лондоне, Гаврской гавани, казарм и кораблей в Кронштадте, Большого театра в Санкт-Петербурге. Одна электрическая свеча могла гореть около 2 часов, при установке нескольких свечей в специальном фонаре, оборудованном переключателем для включения очередной свечи, можно было обеспечить бесперебойное освещение в течение более длительного времени. Изобретение электрической свечи способствовало внедрению в практику переменного тока. Электрическая техника предшествующего периода базировалась исключительно на постоянном токе (телеграфия, гальванотехника, минное дело). Дуговые электрические лампы с регулятором тоже питались постоянным током. При этом положительный электрод сгорал быстрее отрицательного, поэтому его приходилось брать большего диаметра. П.Н. 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 вырос спрос на генераторы переменного тока, которые раньше не находили практического применения.

Значительному развитию электротехники способствовала также и разработка Яблочковым нескольких весьма эффективных систем «дробления

электрической энергии», обеспечивающих 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 получилось несколько независимых цепей, в которые включались свечи) и применение индукционных катушек. Первичные обмотки катушек включались в цепь последовательно, 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 ЭДС во вторичных обмотках катушек. Схема Яблочкова интересна и тем, что в ней впервые получала оформление электрическая сеть с ее основными элементами: первичный двигатель–генератор–линия передачи–трансформатор–приемник.

Но значение электрической свечи этим не ограничивается. 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 доставляется потребителю газ и вода.

Дальнейший прогресс электрического освещения был связан с изобретением лампы накаливания, которая оказалась более удобным источником света, имеющим лучшие экономические и световые показатели. Самая ранняя по времени лампа накаливания построена англичанином Деларью еще в 1809 г. В этой лампе накаливалась платиновая спираль, помещенная в стеклянной трубке. Следующий шаг был сделан в 1838 г., когда бельгиец Жобар стал накаливать угольные стержни в разряженном пространстве. Эта лампа была, конечно, дешевле, но срок ее службы был незначительным. После 1840 г. предлагались многочисленные конструкции ламп накаливания: с телом накала из платины, иридия, угля, графита и т.д.

В 1860 г. изобретатель Сван (Англия) впервые применил для лампы накаливания обугленные полоски толстой бумаги или бристольского картона, накалявшиеся в вакууме. В 1870–1875 гг. проводились работы русским отставным офицером Александром Николаевичем Лодыгиным (1847–1923). Он решил построить летательный аппарат тяжелее воздуха, приводившийся в движение электричеством («электролет»), и для освещения его стал конструировать лампу накаливания с тонким угольным стержнем, заключенном в стеклянном баллоне. Для увеличения времени горения Лодыгин предложил использовать несколько угольных стержней, расположенных так, чтобы при сгорании одного автоматически включался следующий. Первая публичная демонстрация ламп Лодыгина состоялась в 1870 г., а в 1874 г. он получил русскую привилегию (авторское свидетельство) на свою лампу. Затем он запатентовал свое изобретение в нескольких

странах Западной Европы. Постепенно Лодыгин усовершенствовал лампы. Если первые лампы работали 30–40 минут, то со временем, когда он применил вакуумные колбы, срок службы увеличился до нескольких сотен часов. За изобретение лампы накаливания Лодыгин был удостоен Ломоносовской премии Петербургской академии наук. В 90-х гг. XIX в. он предложил в качестве тела накаливания вольфрамовую нить, и новые его лампы демонстрировались на Парижской выставке 1900 г.

Больше всего известности, почестей и славы выпало на долю Эдисона. Но он не изобрел лампы, а сделал нечто большее. Разработал во всех деталях систему электрического освещения и систему централизованного электроснабжения. В 1879 г. Эдисон заинтересовался проблемой электрического освещения. Выходец из достаточно обеспеченной семьи голландских эмигрантов будущий великий изобретатель не получил даже начального официального образования: через несколько занятий в школе он был признан ограниченным и неспособным учеником. Дальнейшим образованием он обязан своей матери, педагогу по профессии, и самостоятельным занятиям. К 1879 г. Эдисон был уже известен как изобретатель автоматического счетчика голосов, как автор усовершенствований в области многократной телеграфии и конструкции телефонного аппарата Белла, как изобретатель фонографа (аппарата, записывающего звук), поскольку работал в то время телеграфистом. Он любил повторять, что всегда, когда хотел сделать что-то новое, он тщательно изучал все, что было сделано по данному предмету до него.

Эдисон сразу поставил перед собой две задачи: лампа должна давать умеренную освещенность и каждая лампа должна гореть совершенно независимо от других. Так он пришел к выводу о необходимости иметь нить высокого сопротивления, что позволяет включать лампу параллельно (а не последовательно, как до этого поступали с любыми электрическими лампами). 12 апреля 1879 г. Эдисон получил первый патент на лампу с платиновой спиралью высокого сопротивления, а затем на лампу с угольными нитями (27 января 1880 г.). Он разработал систему откачки баллонов, технологию крепления вводов к угольной нити. Для того чтобы система освещения стала коммерческой, Эдисон должен был придумать множество устройств и элементов: цоколь, патрон, поворотный выключатель, плавкие предохранители, изолированные провода, крепящиеся на роликах, счетчики электроэнергии, и в заключение построил в 1882 г. в Нью-Йорке первую центральную электростанцию. Эдисон превратил электроэнергию в товар, продаваемый всем желающим, а электрическую установку – в систему централизованного электроснабжения. Это был первый в истории пример комплексного решения крупной проблемы, оказавшей огромное влияние на развитие материальной и общей культуры человечества.

Уже в 80-е гг. XIX в. начинается быстрое развитие электрического освещения, все более расширяется массовое производство ламп накали-

вания, вызвавшее дальнейшее развитие электромашиностроения, электроприборостроения, электроизоляционной техники и совершенствование способов производства и распределения электроэнергии.

Расширение области практического применения электроэнергии потребовало разработки изоляционных материалов. К 70-м гг. XIX в. закладываются основы новых отраслей техники – кабельной и электроизоляционной. Начальный период кабельной техники тесно связан с работами по минной электротехнике и электромагнитному телеграфу. Первый подводный электрический 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 гг. XIX в. создаются специальные машины для обвивки проводов пряжей, в качестве изоляционных материалов начинают применяться резина и гуттаперча. В 1848 г. В. Сименс изобрел пресс для бесшовного наложения на медную жилу резиновой и гуттаперчевой изоляции. Резина стала распространенным электроизоляционным материалом только после внедрения вулканизации (Гудьир, 1839 г.). В начале 50-х гг. XIX в. впервые был получен эбонит, используемый при изготовлении различных электрических приборов и устройств. Для воздушных линий связи и первых электропередач применили изоляторы из стекла и фарфора. Существенную роль в улучшении качества изоляции сыграло создание свинцового пресса (1879), с помощью которого изолированный провод покрывался бесшовной свинцовой оболочкой. В 90-х гг. XIX в. все большее применение для силовых кабелей начинает получать многослойная пропитанная маслом бумажная изоляция.

Вопросы для самопроверки

- 1. Объясните, за счет чего увеличилась продолжительность горения дугового источника света и назовите его недостатки.*
- 2. Когда начали производить крупносерийный выпуск дуговых ламп с дифференциальным регулятором?*
- 3. Объясните суть изобретения Яблочковым «дробления электрической энергии».*
- 4. Назовите основные этапы развития ламп накаливания.*

4.2. Возникновение потребности в электрических машинах переменного тока

Получение переменного тока никогда не вызывало принципиальных трудностей. Но попытки сконструировать соответствующие генераторы до конца 70-х гг. XIX в. носили эпизодический характер, т.к. переменный ток долгое время не находил практического применения. Упомянутый ранее генератор РМ (1832) был, как отмечалось, первым многополюсным синхронным генератором. Все последующие работы в области электрических машин были направлены на изыскание наилучших конструкций коммутирующих устройств, т.е. на превращение генераторов переменного тока в генераторы постоянного тока. В 1863 г. Уайльд разработал в качестве одного из вариантов машины с электромагнитами генератор переменного тока. Внешне он был очень похож на машину, упомянутую ранее, и отличался от неё лишь тем, что вместо коллектора имел два контактных кольца. В 1867 г. Уайльд построил генератор переменного тока, который не имел отдельного возбудителя.

Яблочков в 1878 г. совместно с заводом «Грамма» разработал несколько однотипных конструкций генераторов переменного тока для питания 4, 6, 16, и 20 свечей. Например, в генераторе на 16 свечей кольцевой неподвижный якорь имел секционированную обмотку, секции которой образовывали четыре отдельных цепи по четыре катушки в каждой. На валу машины вращалось восемь полюсов, возбуждавшихся постоянным током. Таким образом, на каждый полюс приходилось по две катушки, индуктировавших токи, сдвинутые по фазе друг относительно друга на четыре периода. Катушки соединялись через одну так, чтобы токи в одной цепи совпадали по фазе. Этот генератор представлял собой 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) и индукторные генераторы (1877 и 1881 гг.).

Серьезные недостатки на пути совершенствования генераторов переменного тока возникли из-за нагрева сердечников, которые до 80-х гг. XIX в. не шихтовались. Таким образом, можно отметить две главные тенденции, определяющие развитие генераторов переменного тока: для увеличения мощности машины – увеличивать число катушек якоря, а для снижения потерь в сердечниках (и, следовательно, их нагрева) – уменьшать объем стали в якоре (некоторые генераторы стали изготавливаться с катушками, не имевшими стальных сердечников). В качестве примера можно привести генератор Сименса (1878) с большим числом катушек на статоре, питаемых от отдельного возбудителя, и катушками без стальных сердечников на роторе. Устранение стальных сердечников, естественно, увеличивало магнитное сопротивление в машине, что снижало ее эффективность. Одной из наиболее крупных машин переменного тока для своего

времени был генератор английского инженера Дж. Гордона (1882). Один из них, установленный на тепловой электростанции в Англии (1885), был выполнен двухфазным и предназначался для раздельного питания различных ламп. Машина имела мощность 115 кВт при напряжении 105 В и массу 18 т. Паровой двигатель сообщал ей частоту вращения 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 гг. XIX в., после того как возникло производство трехфазных машин с шихтованными сердечниками и барабанными якорями (роторами). Поскольку электрическая машина обратима, принципиальных трудностей в создании двигателей переменного тока не было. Уже в 1841 г Ч. Уитстон построил синхронный двигатель, основанный на взаимодействии постоянных магнитов и электромагнитов переменного тока. Из-за отсутствия начального вращающего момента пуск всех однофазных синхронных двигателей был затруднен. Они нуждались в дополнительных разгонных двигателях и поэтому не могли получить широкого распространения. В сетях однофазного тока применялись коллекторные двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением. Венгерские инженеры М. Дэри и О. Блати впервые предложили коллекторные однофазные двигатели в 1885г. Однако широкого распространения эти двигатели тоже не нашли. В настоящее время такой двигатель используется, главным образом, для бытового электропривода (и на электрифицированных железных дорогах однофазного тока).

Вопросы для самопроверки

1. Назовите главные тенденции, определяющие развитие генераторов переменного тока.
2. С какой целью сердечник генератора выполнялся шихтованным?

4.3. Дальнейшее совершенствование генераторов и двигателей

Известно, что индуцированная ЭДС пропорциональна индукции магнитного поля, длине проводника и относительной скорости перемещения проводника в магнитном поле. При всех своих достоинствах кольцевой якорь обладал одним существенным недостатком: каждый виток разделялся на две части – наружную активную, находящуюся в магнитном поле полюсов, и внутреннюю пассивную, находящуюся вне главного поля и фактически не участвующую в образовании ЭДС. Следовательно, использование медной обмотки было плохим. Устранить этот недостаток сумел известный немецкий электротехник, главный инженер фирмы Сименса, член Берлинской академии наук Фридрих Гефнер-Альтенек (1845–1904). В 1873 г. он предложил конструкцию барабанного якоря с петлевой обмоткой, в которой «прямой» проводник проходит по образующей ци-

линдра барабана, а «обратный» – тоже по образующей цилиндра, но в зоне другого полюса (применительно к двухполюсной машине). Не используются только торцевые и лобовые части каждого витка.

Очень важные усовершенствования в конструкцию якоря внес американский изобретатель Хайрен Максим (1840–1916), более известный как автор системы пулемета. В 1880 г. он вновь (после Пачинноти) ввел зубчатый якорь, а также внутренние каналы для вентиляции.

Знаменитый Томас Альва Эдисон (1847–1931) в 1880 г. получил патент на изобретение шихтованного якоря. В патенте указывалось: «...во вращающихся якорях, изготовленных из цельного металла ... токи индуктируются в самой массе металла... Эти токи вызывают вредное влияние. Чтобы устранить это, я изготавливаю якорь из большого числа тонких дисков или колец, закрепленных на валу и отделенных друг от друга легкой изоляцией. Я получил очень хорошие результаты, применяя диски... от 1/32 до 1/64 дюйма толщиной, разделенные между собой листами тонкой бумаги... Благодаря этому полезная мощность машины значительно увеличивается». Примерно такая же толщина листов электротехнической стали сохранилась до настоящего времени, однако склейку листов бумагой со временем заменили лакировкой этих листов.

С 1885 г. началось применение шаблонной обмотки, что значительно улучшило ее качество и снизило стоимость машины. Важнейшим усовершенствованием машины постоянного тока явилось введение в 1884 г. компенсационной обмотки, а в 1885 г. – дополнительных полюсов, с помощью которых удалось компенсировать реакцию якоря и улучшить коммутацию. В 1891 г. немецким профессором Э. Арнольдом была опубликована первая работа, посвященная теории и конструированию обмоток электрических машин.

Длительную эволюцию претерпела конфигурация магнитной системы электрических машин. Пока не были выяснены основные соотношения между геометрическими размерами, магнитодвижущими силами и индукциями, сердечники полюсов были либо излишне громоздкими, либо напротив, имели очень малое сечение и большие длины. Магнитные системы были очень часто несимметричными и имели несколько стыков, представлявших собой технологические зазоры. Явление магнитного насыщения открыто Дж. Джоулем в 1840 г. Весьма прогрессивными были труды выдающегося русского физика Александра Григорьевича Столетова (1839–1896) по исследованию магнитных свойств «мягкого железа», выполненные в 1871 г. Он показал, что магнитная восприимчивость железа с ростом напряженности магнитного поля сначала возрастает, проходит через максимум и затем уменьшается. Следовательно, при проектировании электрической машины следует учитывать сорт железа и выбирать рациональный режим намагничивания.

В 1880 г. после открытия независимо друг от друга итальянским физиком А. Ричи и немецким физиком Э. Варбургом явления гистерезиса начались исследования потерь в стали при перемагничивании (английский ученый Д. Юнг, американский электротехник Ч.П. Штейнмец). Большое значение для проектирования электрических машин имели работы английских электротехников Дж. Гопкинсона и Г. Роуланда (1873), сформулировавших и исследовавших законы магнитной цепи. Все эти открытия способствовали переходу к достаточно строгому анализу и проектированию электрических устройств. Магнитная система электрических машин приобретала все более компактную и симметричную форму. Вслед за двухполюсными машинами в 80-е гг. XIX в. стали строиться четырехполюсные и вообще многополюсные машины. Одним из пионеров в применении многополюсных машин, предлагавшихся еще Грамом, был русский электротехник М.О. Доливо-Добровольский.

Развитие электрических машин и аппаратов вызвало необходимость в разработке специальных термостойких электроизоляционных материалов. Для повышения термостойкости создаются пропиточные составы, а также композиционные изолирующие материалы. Для изоляции пластин коллектора начинают применять слюду. В начале 90-х гг. XIX в. на основе слюды создаются различные новые материалы: миканит, микалента, микафоллий, нашедшие широкое применение для изоляции в электрических приборах и машинах. В конце XIX – начале XX вв. создаются также различные синтетические высокомолекулярные соединения, на основе которых разрабатываются новые электроизоляционные материалы, которые, наряду с хорошими электрическими свойствами, обладают высокой термо- и влагостойкостью.

Вопросы для самопроверки

- 1. Какие специальные термостойкие электроизоляционные материалы были разработаны и для чего?*
- 2. Какие усовершенствования были внесены в конструкцию якоря электрических машин?*

4.4. Развитие трансформаторов

Восьмидесятые годы XIX в. вошли в историю техники под названием периода «трансформаторных битв». Такое необычное название они получили потому, что изобретение трансформатора явилось одним из сильнейших аргументов в пользу переменного тока. А настоящая битва шла между сторонниками систем постоянного и переменного токов и отражала поиски путей выхода из назревающего энергетического кризиса, связанного с проблемой централизованного производства электроэнергии и передачи ее на большие расстояния.

Схематическое изображение будущего трансформатора впервые появилось в 1831 г. в работах Фарадея и Генри. Однако ни тот, ни другой не

отмечали в своем приборе такого свойства трансформатора, как изменение напряжений и токов, т.е. трансформирования переменного тока. Они демонстрировали индукцию при замыкании и размыкании цепи постоянного тока.

В 1836 г. ирландский физик Николас Каллан (1799–1864) изобрел индукционную катушку. В 1838 г. это изобретение повторил американский изобретатель Чарлз Пейдж, но наибольшую известность получил немецкий механик Генрих Румкорф (1803–1877), именем которого впоследствии стали называть индукционную катушку. Такие катушки предназначались для получения искрового разряда во вторичной цепи при прерывании постоянного тока в первичной цепи. Катушку Румкорфа приспособил для дистанционного взрывания мин Б.С. Якоби. В последней трети XIX в. индукционные катушки получили широкое распространение в системах зажигания двигателей внутреннего сгорания.

П.Н. Яблочков видел в индукционной катушке устройство для разделения цепей переменного тока. Даже самим фактом патентования системы «дробления света» во многих странах он как бы подчеркнул важность нового предложения. Во французском патенте от 30 ноября 1876 г. Яблочков писал: «Предметом этого изобретения является распределение токов в целях производства электрического света, позволяющего получить, пользуясь цепью, питаемой одним единственным источником электричества, неопределенное число источников света ..., при этом если я применяю источник переменного тока, общее расположение остается неизменным, но прерыватель остается ненужным».

Система «дробления света» широко демонстрировалась на Парижской международной электротехнической выставке в 1881 г. и на второй Петербургской электротехнической выставке в 1882 г. (где всю систему разработал и экспонировал препаратор Московского университета И.Ф. Усагин). Бобины, как их тогда называли, имели одинаковое число витков в первичной и вторичной обмотках, а стальной сердечник был разомкнутым и представлял собой стержень, на который наматывались обмотки. В начале 80-х гг. XIX в. становилось все яснее, что система электроснабжения на постоянном токе не имеет перспектив. Из опыта эксплуатации дуговых источников света было установлено оптимальное напряжение 110 В. Радиус электроснабжения не превышал нескольких сотен метров. Попытка расширить границы зоны электроснабжения привели к рождению так называемой трехпроводной системы постоянного тока ($110 \times 2 = 220$ В). Но основным направлением развития электроэнергетики становится уже в 80-х гг. XIX в. система переменного тока.

Новым шагом в использовании трансформаторов с разомкнутым сердечником для распределения электроэнергии явилась «система распределения системы электричества для производства света и двигательной силы», запатентованная во Франции в 1882 г. Голяром и Гиббсом. Транс-

форматоры Голяра и Гиббса предназначались уже не только для «дробления» энергии, но и для преобразования напряжения, т.е. имели коэффициент трансформации, отличный от единицы. «Вторичный генератор» (как его называли) имел следующую конструкцию: на деревянной подставке укреплялось несколько индукционных катушек, первичные обмотки которых соединялись последовательно. Вторичные обмотки катушек были секционированы и каждая секция имела два вывода для подключения приемников. Заслуживают внимания выдвижные сердечники катушек, с помощью которых регулировалось напряжение на вторичных обмотках. Трансформаторы с разомкнутым сердечником в 1883 г. устанавливаются на подстанциях Лондонского метрополитена, а в 1884 г. – в Турине (Италия).

После изобретения ламп накаливания и других приемников, для которых важно было поддерживать постоянное напряжение, более целесообразным стало их параллельное включение. При параллельном включении приемников применение трансформаторов с разомкнутыми сердечниками становилось технически неоправданным. Поэтому понятно стремление сконструировать трансформаторы с замкнутой магнитной системой, которые имеют значительно лучшие характеристики (меньший намагничивающийся ток, а, следовательно, меньшие потери и больший КПД). Первые трансформаторы с замкнутым сердечником были созданы в Англии в 1884 г. братьями Джоном и Эдуардом Гонкинсон. Сердечник этого трансформатора был набран из стальных полос или проволок, разделенных изоляционным материалом, что снижало потери на вихревые токи. На сердечнике помещались, чередуясь, катушки высшего и низшего напряжений.

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

Передача электроэнергии переменным током высокого напряжения оказалась возможной после создания 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 М. Дери (1854–1934), О. Блати (1861–1938) и К. Циперновским (1853–1942), впервые предложившими сам термин «трансформатор». Серийные стержневые трансформаторы системы Блати, Дери и Циперновского выпускались электромашиностроительным заводом в Будапеште фирмы «Ганц и К» и содержали все основные элементы современных однофазных трансформаторов. Венгерские инжене-

ры нашли оптимальные соотношения между расходом меди и стали в трансформаторах и обеспечили своей продукции широкий сбыт на мировом электротехническом рынке. В частности, эта фирма осуществила в 1887 г. одну из первых в России установок переменного тока для освещения оперного театра в Одессе. В 1885 г. фирмой «Вестингауз» был создан первый автотрансформатор, который предложил У. Стенли в конце 80-х гг. XIX в. Д. Свинберн предложил масляное охлаждение трансформаторов.

Первые системы электроснабжения переменным током рождались в условиях ожесточенной конкурентной борьбы электротехнических фирм. За спорящими учеными стояли крупные фирмы. Так, непримиримым борцом против переменного тока в 80-х гг. XIX в. выступил знаменитый Эдисон. А инженер фирмы Эдисона Г. Браун, стремясь заполучить заказ на новый вид продукции, в пылу полемики публично вызвал соперника из фирмы «Вестингауз» на дуэль на электрических стульях. Исход дуэли должен был решить, какой же стул делать: на постоянном или переменном токе. В том числе и в России в докладах ученых и в газетных статьях система переменного тока обличалась как нечто еретическое, нерациональное и безусловно гибельное.

Вопросы для самопроверки

- 1. Опишите конструктивное исполнение первого трансформатора.*
- 2. Когда и кем был создан первый замкнутый магнитный сердечник?*
- 3. Когда был создан первый автотрансформатор и в чём его отличие от однофазного трансформатора?*

4.5. Поиски путей передачи электроэнергии на большие расстояния

Водяное колесо – символ докапиталистического производства – вызвало к жизни проблему распределения энергии от центрального двигателя к отдельным машинам и станкам. Но тогда могли существовать только механические средства передачи энергии: штанги, тяги, канаты. При необходимости передачи энергии на десятки метров стали применять приводные рамки. Возникла трансмиссионная передача, которая надолго пережила энергетику водяного колеса, и хорошо послужила человечеству в эпоху пара, а частично сохранила свои позиции и на первых этапах развития электропривода. Опыты использования электромагнитного телеграфа привели к мысли о возможности передачи по проводам более значительных количеств электроэнергии. Уже в 40–50-х гг. XIX в. в США, Италии и других странах высказывались идеи о создании электрической железной дороги с передачей электроэнергии на расстояние.

Однако всеобщую известность получили опыты французского электрика Ипполита Фонтена. В 1873 г. в Вене состоялась международная выставка, с которой и начинается история электропередачи. На этой вы-

ставке Фонтен демонстрировал обратимость электрических машин. При этом между генератором и двигателем, приводящем в действие насос искусственного декоративного водопада, включил кабель (намотанный на барабан) длиной несколько больше 1 км. Этим опытом была продемонстрирована возможность передачи электроэнергии на расстояние.

Вместе с тем Фонтен не был убежден в экономической целесообразности электропередачи, т.к. при включении соединительного кабеля он получил большие потери электроэнергии в нем.

Как известно, потери в линии зависят от напряжения, удельного сопротивления провода и его сечения. Снижение удельного сопротивления проводов практически осуществить в то время было невозможно, т.к. основным материалом для проводов служила медь с предельно малым удельным сопротивлением. Лишь в настоящее время ведутся теоретические и экспериментальные работы по снижению сопротивления электропередач с использованием явления сверхпроводимости (криогенные линии электропередач). Поэтому имелось только два пути для снижения потерь в линии: увеличение сечения проводов или повышение напряжения.

В 70-х гг. XIX в. был исследован первый путь. Русский военный инженер Федор Апполонович Пироцкий (1845–1898) в 1874 г. пришел к выводу об экономической целесообразности производства электроэнергии в тех местах, где она может быть дешево получена благодаря наличию топлива или гидравлической энергии, и передачи ее по линии к более или менее удаленному потребителю. В том же году он приступил к опытам передачи электроэнергии на артиллерийском полигоне Волкова поля (около Петербурга), используя электрическую машину Грамма. Дальность передачи в опытах Пироцкого составляла вначале более 200 м, а затем была увеличена до 1 км. Для уменьшения потерь в линии он предлагал использовать в качестве проводников железнодорожные рельсы. Стремясь проверить свои выводы, Пироцкий в конце 1875 г. провел опыты передачи электроэнергии по рельсам бездействующей ветки Сестрорецкой железной дороги длиной около 3,5 км. Оба рельса изолировались от земли, один из них служил прямым, а второй обратным проводом.

Необходимо отметить, что Пироцкий был не единственным электротехником, ставшим на путь увеличения сечения проводов. Так, например, В. Сименс, посетив в 1876 г. Ниагарский водопад утверждал, что для передачи энергии водопада на расстояние 50 км потребуются проводники диаметром 76 мм. Иными словами, как заявил Сименс, для изготовления проводов придется использовать целый медный рудник.

Несмотря на нерациональность практического направления, избранного Пироцким, его опыты привлекли внимание к вопросам электропередачи вообще и вызвали целый ряд новых исследований, приведших к выявлению правильного пути решения этой проблемы. Предложение Пироцкого об использовании железнодорожных рельсов для передачи элек-

троэнергии на расстояние нашло применение уже при разработке первых проектов городских электрических железных дорог.

Другой путь решения проблемы передачи электроэнергии, основанный на повышении напряжения, длительное время осмысливался теоретически. Можно отметить исследование классической задачи из теории электрических цепей о передаче энергии от источника к нагрузке, выполненное в 1844 г. французским академиком Э. Маскаром, но не доведенное до ясных практических выводов. Наиболее обстоятельно исследовали этот вопрос в 1880 г. независимо друг от друга французский инженер (впоследствии академик) Марсель Депре (1843–1918) и профессор физики Петербургского лесного института Дмитрий Александрович Лачинов (1842–1902).

В марте 1880 г. в протоколах Парижской академии наук был опубликован доклад М. Депре «О коэффициенте полезного действия электродвигателей и об измерении количества энергии в электрической цепи». Автор доклада вошел в историю как изобретатель определенных систем амперметра, ваттметра, аperiодического гальванометра, принципа смешанного (компаундного) возбуждения электрических машин, электромагнитного молота (двигателя возвратно-поступательного движения) и электрической системы синхронной связи движений. Депре математически доказал, что КПД установки, состоящей из электродвигателя и линии передачи, не зависит от сопротивления самой линии. Но вначале Депре не удалось установить, что этот вывод справедлив только при определенном условии, а именно при увеличении напряжения передачи. Это условие впервые было отмечено Д.А. Лачиновым в статье «Электромеханическая работа», опубликованной в июне 1880 г. в первом номере журнала «Электричество». На основе математических выкладок он показал, что в электропередаче «полезное действие не зависит от расстояния» лишь при условии увеличения скорости вращения генератора (т.е. при повышении напряжения в линии, т.к. ЭДС, развиваемая генератором, пропорциональна частоте его вращения). Лачинов также установил количественное соотношение между параметрами линии электропередачи, доказав, что для сохранения КПД передачи при увеличении сопротивления в n раз, необходимо увеличить частоту вращения генератора в $\sqrt{n}$ раз. К подобным же выводам пришел год спустя 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 движение генератор постоянного тока мощностью 3 л.с., дававший ток напряжением 1,5–2 кВ. Электроэнергия передавалась по стальным телеграфным проводам диаметром 4,5 мм на территорию выставки в Мюнхене, где была установлена такая же машина, работавшая в режиме двигателя и приводившая в движение насос искусственного водопада. Хотя этот первый опыт и не дал достаточно благоприятных технических результатов (КПД 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.

Следует отметить, что теория телеграфных линий была разработана в то время достаточно хорошо. Но то, что целесообразно для «слаботочной» техники, становится нецелесообразным для «сильноточной», т.е. энергетической техники. В последнем случае важен экономический эффект, и КПД следует всемерно повышать в ущерб количеству передаваемой энергии. В телеграфии было известно, что наибольший эффект в работе приемного устройства достигается тогда, когда его сопротивление равно внутреннему сопротивлению источника энергии вместе с сопротивлением соединительных проводов (согласованный режим), но при этом теоретический КПД всей установки составляет 50%. Это обстоятельство длительное время оказывалось труднодоступным для понимания и многие специалисты теряли перспективу в научно-технических поисках и порой прекращали работу лишь потому, что не могли освободиться от привычных рамок слаботочных целей.

В 1855 г. были проведены новые опыты на расстоянии 56 км между Крейлем и Парижем. В качестве генераторов постоянного тока высокого напряжения использовались специально построенные машины, дававшие напряжение до 6 кВ. Масса такой машины была около 70 т, мощность – около 50 л.с., КПД передачи – около 45%. Наряду с опытными установками для передачи электроэнергии на расстояние в эти годы были осуществлены единичные установки передачи электроэнергии для промышленного использования с КПД до 75%.

Тем не менее, попытки решить проблему передачи электроэнергии на постоянном токе, осуществленные в 80-х гг. XIX в., не принесли желаемых результатов. При этом важно отметить 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. Но, с другой стороны, широкая электрификация промышленности могла быть осуществлена только при централизованном производстве электроэнергии, а следовательно, только при обеспечении передачи электроэнергии на значительные расстояния.

Для передачи энергии требовалось получить высокие напряжения, а технические возможности того времени не позволяли строить генераторы высокого напряжения постоянного тока. Например, машины Депре часто выходили из строя из-за порчи изоляции. Вообще говоря, в любом случае возможности передачи электроэнергии при генераторном напряжении ограничены сравнительно низкими пределами. Кроме того, постоянный ток высокого напряжения трудно было использовать потребителям (нуж-

но было строить двигатель – генераторную установку для преобразования высокого напряжения в низкое).

Еще один путь использования постоянного тока для электропередачи был предложен Д.А. Лачиновым. Он рекомендовал для повышения напряжения соединять последовательно несколько машин на концах линии. В этом случае каждая в отдельности машина могла быть рассчитана на более низкое напряжение и, следовательно, могла быть надежнее. Фонтен первым реализовал эту идею практически, осуществив в 1886 г. передачу, в которой на источнике постоянного тока работали 4 последовательно-соединенные генератора (по 1500 В), а на приемном конце линии – 3 двигателя суммарной мощностью около 50 л.с. Двигатели могли использоваться непосредственно для привода исполнительных механизмов, могли вращать генераторы низкого напряжения, используемые для целей освещения. КПД этой установки достигал 52%. Позднее эта идея последовательного соединения генераторов была развита в электропередачах по системе Р. Тюри.

Трудности, связанные с электропередачей на постоянном токе направили мысли ученых на разработку теории и техники переменного тока. Когда основные элементы техники переменного тока (генераторы, трансформаторы) были разработаны, начались попытки осуществления промышленной передачи электроэнергии 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. В следующем году на Туринской выставке Голяр осуществил передачу мощности около 40 л.с. на 40 км при напряжении 2000 В.

Однако во второй половине 80-х гг. XIX в. уже возникла и очень беспокоила инженеров и ученых задача включения двигательной нагрузки в сеть электрических станций. Таким образом, и при передаче электроэнергии однофазным переменным током возникло противоречие не менее серьезное, чем при передаче электроэнергии постоянным током. Для передачи электроэнергии затруднений не было. Но однофазные двигатели переменного тока имели совершенно неприемлемые для целей практики характеристики. В частности, они либо вообще не имели пускового момента (синхронные двигатели), либо пускались с большим трудом из-за тяжелых условий коммутации тока (коллекторные двигатели). Поэтому сфера применения однофазного тока ограничивалась почти исключительно электрическим освещением, что, конечно, не могло удовлетворить требования промышленности.

Вопросы для самопроверки

1. По каким причинам передача постоянного тока не получила широкого распространения?

2. *Какие пути решения проблемы передачи электроэнергии были предложены учёными?*

3. *Почему сфера применения однофазного тока ограничилась исключительно электрическим освещением?*

4.6. Ранние электростанции

Электрические станции появились не сразу. В 70-х и начале 80-х гг. XIX в. место производства электроэнергии не было отделено от места ее потребления. Электростанции, обеспечивающие электроэнергией ограниченное число потребителей, назывались блок-станциями (иногда их 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 характера. Так, городские власти запрещали сооружение воздушных линий, не желая портить внешний вид города. Конкурирующие газовые компании всячески подчеркивали действительные и мнимые недостатки нового вида освещения.

На электростанциях, строившихся в конце 70-х и в начале 80-х гг. XIX в. 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-станции широко применялись локомобили. От первичного двигателя к генератору делалась ременная передача, позволявшая приводить в движение быстроходные генераторы от сравнительно тихоходных паровых машин, имевших частоту вращения не более 200 об/мин. Обычно один паровой двигатель приводил в действие до 3-х электрогенераторов, поэтому на крупных блок-станциях того времени устанавливались несколько паровых машин и локомобилей.

Впервые блок-станции были построены в Париже для освещения улицы 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 гг. XIX в. и быстро вытеснили блок-станции. В связи с тем, что в начале 80-х гг. XIX в. массовыми потребителями электроэнергии были только источники света,

первые центральные электростанции проектировались, как правило, для питания осветительной нагрузки и вырабатывали постоянный ток. В сентябре 1882 г. была сдана в эксплуатацию, (сооружение началось в 1881 г.) первая в мире центральная электростанция в Нью-Йорке (на Пильстрит) на основе соглашения группы американских финансистов с Эдисоном. В машинном зале станции было установлено 6 генераторов Эдисона. Мощность каждого генератора составляла примерно 90 кВт. Здание станции и ее оборудование были спроектированы весьма целесообразно, так что в дальнейшем при строительстве новых центральных электростанций (ЦЭС) 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 осуществлялась 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 район (по тому времени) площадью 2,5 км². Вскоре в Нью-Йорке было построено еще несколько ЦЭС.

Исходное напряжение первых электростанций, от которого впоследствии были произведены другие, образовавшие известную шкалу напряжений, сложилась исторически. Дело в том, что в период исключительно 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 период зажигания ламп (при соприкосновении углей) и для более устойчивого горения дуги последовательно с дуговой лампой включали балластный резистор. Также эмпирически было найдено, что сопротивление этого резистора должно быть таким, чтобы падение напряжения на нем при нормальной работе составляло 20 В. Таким образом, общее напряжение в установках сначала составляло 65 В, и это напряжение применялось долгое время. Однако часто в одну цепь включали последовательно две дуговых лампы, для работы которых требовалось напряжение 110 В (2х45+20). Это напряжение почти повсеместно было принято в качестве стандартного, а именно оно открывает современную шкалу напряжений, хотя причина выбора давно забыта.

Уже при проектировании первых ЦЭС столкнулись с трудностями, которые в достаточной степени не были преодолены в течение всего периода господства техники постоянного тока. Радиус электроснабжения определяется допустимыми потерями напряжения в электрической сети. Именно это обстоятельство заставляло строить ЦЭС в центральных районах города, что существенно усложняло не только обеспечение водой и

топливом, но и удорожало стоимость земельных участков для строительства станций, т.к. земля в центре города была чрезвычайно дорогой. Этим, в частности, объясняется необычный вид нью-йоркских станций, на которых оборудование располагалось на многих этажах. Положение осложнялось еще и тем, что на первых ЦЭС приходилось размещать большое число котлов, паропроизводительность которых не соответствовала новым требованиям, предъявленным электроэнергетикой.

Первые петербургские электростанции, которые обслуживали район Невского проспекта, размещались на реках Мойке и Фонтанке (начало 80-х гг. XIX в.). Строители исходили из соображений дешевого водоснабжения. Кроме того, не нужно было приобретать земельные участки, близкие к потребителю. В 1886 г. в Петербурге было учреждено акционерное «Общество электрического освещения 1886 года», которое приобрело станции на реках Мойке и Фонтанке и построило еще две. Мощность каждой из этих станций едва превышала 200 кВт. В Москве первая ЦЭС (Георгиевская) была построена в 1886 г. в центре города, на углу Большой Дмитровки (ныне Пушкинская улица) и Георгиевского переулка. Её мощность составляла 400 кВт.

Ограниченные возможности радиуса электроснабжения привели к тому, что удовлетворить спрос на электроэнергию со временем становилось все труднее. Так, в Петербурге и Москве к середине 90-х гг. XIX в. возможности присоединения новой нагрузки к существующим станциям были исчерпаны, и встал вопрос об изменении схем сети и даже об изменении рода тока. Рост потребности в электрической энергии эффективно стимулировал повышение производительности и экономичности тепловой части электростанций. Прежде всего следует отметить решительный поворот от паровых машин к паровым турбинам. Первая паровая турбина на электростанциях России бала 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. Удаленность нагрузки от электростанций не превышала нескольких сотен метров. В то же время электростанции-предприятия стремились расширить круг потребителей своего товара – электроэнергии. Этим объясняются настойчивые поиски путей увеличения площади электроснабжения при условии сохранения уже построенных станций постоянного тока. Было найдено несколько путей увеличения радиуса распределения электроэнергии.

Первое решение, которое во многих случаях могло 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 электростанциях соединялись последовательно, и от общей точки шел нейтральный провод. При этом обычные лампы сохранялись. Они включались, как правило, между рабочими и нейтральными проводами, 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 был обычно меньше рабочего тока. Это позволяло выбирать сечение нейтрального провода меньшим (обычно $1/2$ или $1/3$ сечения рабочего провода). Сечение рабочих проводов тоже уменьшалось по сравнению с сечением проводов в двухпроводной системе. Это объяснялось тем, что при увеличении напряжения вдвое ток при той же мощности вдвое уменьшался, а потери мощности, пропорциональные квадрату тока, снижались вчетверо. Практическими результатами применения трехпроводной системы являлись, во-первых, увеличение радиуса электроснабжения примерно до 1200 м, во-вторых, относительная экономия меди (при всех прочих одинаковых условиях расход меди при трехпроводной системе был практически вдвое меньше, чем при двухпроводной). Трехпроводная система широко применялась как в России, так и за рубежом. Она сохранилась вплоть до 20-х гг. XX в., а в отдельных случаях применялась и позднее.

Максимальный вариант многопроводных систем – пятипроводная сеть постоянного тока, в которой применялись четыре последовательно включенных генератора, а напряжение увеличивалось вчетверо. 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 (ее автор В. Сименс) не получила широкого применения.

Второй путь увеличения радиуса электроснабжения предлагал сооружение аккумуляторных подстанций. Аккумуляторные батареи (АБ) в то время были обязательным дополнением каждой электростанции. Они покрывали пики нагрузок. Заряжаясь в дневные и ночные часы, они служили резервом. АБ, так же как и на современных электростанциях, размещались в специальных обширных помещениях. Для увеличения радиуса электроснабжения АБ устанавливались на подстанциях в двухпроводных сетях постоянного тока. Эти подстанции сооружались вблизи отдельных потребителей. Группы АБ, соединенные последовательно, заряжались от ЦЭС при двойном напряжении, а при параллельном соедине-

нии они питали местную нагрузку. Сети с аккумуляторными подстанциями получили некоторое распространение. В Москве, например, была построена в 1982 г. аккумуляторная подстанция в Верхних торговых рядах (ныне ГУМ), находившаяся на расстоянии 1385 м от Георгиевской ЦЭС. На этой подстанции были установлены АБ, питавшие около 2000 ламп накаливания.

В последние два десятилетия XIX в. было построено много электростанций постоянного тока и они долгое время давали значительную долю общей выработки электроэнергии. Мощность таких электростанций редко превышала 500 кВт, а 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 гг. XIX в. начинают сооружаться электростанции переменного тока, выгодность которых с точки зрения увеличения радиуса электроснабжения была бесспорной. Если не считать блокстанций 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 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, финансировавшая работы, не соглашалась оплачивать высокую стоимость земельного участка в центре города, Ферранти выбрал место для новой ЦЭС в одном из предместий Лондона (Дептфорде), находящимся в 12 км от Сити. При сооружении этой установки были применены мощные по тому времени генераторы переменного тока высокого напряжения (мощностью 1000 л.с. каждый, напряжением 10 кВ). Причем в отличие от старых генераторов, которые приводились в движение от паровой маши-

ны при помощи канатной передачи, новые генераторы были непосредственно соединены с быстроходными вертикальными паровыми машинами. Частота вращения вала поршневых паровых двигателей все же была недостаточной. Этим объясняется своеобразная конструкция электрических генераторов того времени: они имели большие диаметры и малые длины. Такие же в общем соотношения между диаметрами и длиной машины сохранились и в настоящее время на гидроэлектростанциях с относительно тихоходными водяными турбинами в качестве первичного двигателя. Общая мощность Дептфордской станции составила 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 (ГЭС) однофазного тока, питавшей осветительную нагрузку, может служить станция, построенная в 1889 г. на водопаде вблизи Портленда (США). На этой станции гидродвигатели приводили в действие восемь однофазных генераторов общей мощностью 720 кВт. Кроме того, на станции были установлены 11 генераторов, предназначенных специально для питания дуговых ламп (по 100 ламп на каждый генератор). Электроэнергия этой ГЭС передавалась на расстояние 14 миль в Портленд. Характерная особенность первых электростанций переменного тока – изолированная работа отдельных машин.

В России крупнейшие станции однофазного тока были сооружены в конце 80-х и начале 90-х гг. XIX в. Первая ЦЭС построена венгерской фирмой «Ганц и К» в Одессе (1887). Основным потребителем электроэнергии была система электрического освещения нового театра. Эта станция имела два синхронных генератора общей мощностью 160 кВт с частотой 50 Гц, напряжением 2 кВ. От станции электроэнергия поступала по линии длиной 2,5 км к трансформаторной подстанции театра, где напряжение понижалось до 65 В (на которое были рассчитаны лампы накаливания). В том же году началась эксплуатация электростанции постоянного тока в Царском селе (ныне город Пушкин). Протяженность воздушной сети в Царском селе уже в 1864 г. была около 54 км. В 1890 г. эта электростанция 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. инженером Н.В. Смирновым. Мощность ее составляла 800 кВт и превышала мощность любой существовавшей в то время станции постоянного тока. Применение переменного тока напряжением 2000 В позволило упростить и удешевить электрическую сеть,

увеличить радиус электроснабжения (более 2 км при потере напряжения в магистральных проводах до 3% вместо 17–20% в сетях постоянного тока). Таким образом, опыт эксплуатации ЦЭС и сетей однофазного переменного тока показал преимущество переменного тока, но вместе с тем выявил ограниченность его применения. Однофазная система тормозила развитие электропривода. Так, например, при подключении силовой нагрузки к сети Дефтфордской электростанции приходилось дополнительно на валу каждого синхронного двигателя (однофазного) помещать еще разгонный коллекторный двигатель переменного тока.

Вопросы для самопроверки

- 1. Когда и где впервые было выполнено централизованное производство электроэнергии?*
- 2. Где были построены первые блок-станции и в чём их преимущества?*
- 3. От чего зависело значение напряжения первых электростанций?*
- 4. С какой целью применяли аккумуляторные батареи на подстанциях?*

4.7. Развитие теории электрических цепей переменного тока

До 80-х гг. XIX в. шло постепенное накапливание сведений об особенностях физических процессов в цепях переменного тока, к числу которых главным образом относятся возможные различия в фазах напряжения и тока, возбуждение ЭДС самоиндукции и взаимной индукции, существование тока через конденсатор. Количественные соотношения иногда только угадывались за качественными рассуждениями, как это было характерно для всех исследований Фарадея. Да и более поздние исследования носили еще качественный характер. Например, Б.С. Якоби, анализируя образование ЭДС в генераторе, утверждал, что она пропорциональна угловой скорости вращения якоря, числу витков обмотки и интенсивности магнитного поля. В работах Гельмгольца, Максвелла, У. Томсона (лорда Кельвина), Ф. Неймана и других физиков появляются строгие математические связи между мгновенными значениями токов и напряжений, появляются основные уравнения цепей в дифференциальной форме. В 80-х гг. XIX в. делаются попытки сравнения действия постоянного и переменного токов, вводится понятие об идеальном синусоидальном токе.

У. Томсон показал возможность применения гармонического анализа Фурье для любого периодического (несинусоидального) тока (Фурье свой знаменитый метод предложил в 1822 г., разрабатывая теорию тепла). В свете гармонического анализа несинусоидальных токов выяснилась

вредная роль высших гармоник и был сделан вывод о необходимости принимать специальные технические меры для получения в генераторах ЭДС, по форме возможно близкой к синусоиде. В 90-х гг. XIX в. на страницах электротехнических журналов состоялась полемика о синусоиде.

В 1887 г. Гизберт Капп (1852–1822), впоследствии профессор Бирмингемского университета, вывел точную формулу трансформаторной ЭДС, известной ныне каждому электрику: $e=4,44f\Phi\omega$. Большой вклад в развитие теории переменного тока внес итальянский физик Г. Феррарис, который впервые (1886) рассматривает разность фаз токов и напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора, а также предлагает метод расчета потерь на гистерезис и вихревые токи. Позднее, в 1893 г., он исследовал и процессы в однофазных двигателях, применив метод вращающихся векторов. В 1898 г. был опубликован труд Феррариса под названием «Научные основания электротехники». Это было первое руководство по теоретической электротехнике, появившееся в русском переводе в 1904 г.

В 1889 г. профессор Гринвичского морского училища Томас Блеклей предложил изображать синусоидальную величину в виде вектора. Метод векторных диаграмм открыл широкие возможности для наглядных представлений о процессах в цепях гармонического тока. В частности, этот метод позволил распространить закон Ома на цепи, содержащие резисторы, индуктивности и емкости, находящиеся под воздействием гармонических напряжений.

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) он показал, что магнитный поток в магнитопроводе катушки, включенной в цепь переменного тока, целиком определяется напряжением (если считать частоту и число витков заданными) и не зависит от магнитного сопротивления. С изменением магнитного сопротивления изменяется только намагничивающий ток. Это положение является исходным во всех расчетах электромагнитных устройств. Также он отметил, что если магнитный поток изменяется синусоидально, то ЭДС (или соответственно напряжение) также изменяется по закону синуса, причем ЭДС и магнитный поток различаются по фазе на $\pi/2$. Им были введены понятия активной и реактивной составляющих тока, которые он назвал 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 предложил принять в качестве основной кривой тока си-

нусоиду. 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 скорости вращения электрических машин (при том же числе полюсов), а снижение частоты неблагоприятно отражается на равномерности освещения.

Несколько позднее (1892) Доливо-Добровольский разработал на базе сформулированных положений основы теории и проектирования трансформаторов, опровергнув распространившееся ошибочное утверждение о том, что трансформаторы принципиально не могут быть экономичными аппаратами. Вопросы теории трансформаторов были исследованы в 90-х гг. XIX в. трудами ряда других ученых (С. Эвершедда, Бен-Эшенбурга, Г. Каппа).

На основе метода векторных диаграмм появилась возможность исследовать поведение электрической цепи при изменении одного из параметров. Так стали известны линейные и круговые диаграммы, т.е. метод геометрических мест. Особенно продуктивными они оказались для теории электрических машин (А. Гейланд). В 1902 г. И. Лакур опубликовал книгу, в которой дал описание построения круговой диаграммы по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. Логическим завершением общей теории цепей переменного тока явилась идея поместить векторную диаграмму на комплексную плоскость. Это позволило тригонометрические операции над векторными изображениями синусоидальных функций времени заменить алгебраическими операциями над комплексными числами. Несмотря на то, что идея применения комплексных чисел для анализа цепей при гармонических воздействиях буквально носилась в воздухе, несомненная заслуга в широком распространении метода комплексных амплитуд («символического метода») принадлежит известному американскому электротехнику Чарльзу Протеусу Штейнмecu (1865–1923). В 1901 г. Штейнмец издал фундаментальный труд под названием «Теоретические основы электротехники».

В 1899 г. в Лондоне был опубликован и другой символический метод, который предлагал замену любого аналитически выраженного воздействия его операторным изображением. Английский физик Оливер Хевисайд (1850–1925), увлеченный трактатом Максвелла, запершись как одинокий отшельник в своем домашнем кабинете, решал одну за другой задачи из теории электрических цепей и электромагнитных полей. Когда ему доставало математических знаний, он тут же развивал необходимый математический аппарат. Так для решения задач о переходных процессах он придумал операционное исчисление, основанное на преобразовании Лапласа.

К концу XIX в. нашла естественное завершение в главных своих частях теория электрических цепей. По мере расширения практических применений электроэнергии началась подготовка научных и инженерных кадров электротехников. В отдельных технических учебных заведениях были введены специальные курсы. Например, в России еще в 1840 г. был организован офицерский класс для изучения электричества и магнетизма в связи с потребностями минной электротехники. В 1856 г. Главное инженерное училище военного ведомства стало готовить инженеров по электротехнике. В 1884 г. в Петербургском технологическом институте появилась электротехническая специальность, а в 1891 г. на базе Телеграфного училища был открыт Петербургский электротехнический институт. В Петербургском политехническом институте, открытом в 1902 г., будущий академик Владимир Федорович Миткевич (1872–1951) с 1904 г. начал читать курс «Теория электрических и магнитных явлений», а в Московском Высшем техническом училище с 1905 г. начал преподавание курсов «Теория переменных токов» и «Электрические измерения» будущий член корреспондент Академии наук СССР и профессор Московского энергетического института Карл Адольфович Круг (1873–1952). С именами В.Ф. Миткевича и К.А. Круга связано возникновение петербургской и московской электротехнических школ.

Вопросы для самопроверки

1. Какие учёные внесли существенный вклад в теорию переменного тока?
2. Назовите область применения метода геометрических мест.
3. Кто опровергнул распространившееся ошибочное утверждение о том, что трансформаторы принципиально не могут быть экономичными аппаратами?

Тема 5. СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ

5.1. Открытие явления вращающегося магнитного поля

Начало современного этапа в развитии электроэнергетики относится к 90-м гг. XIX в., когда решение комплексной энергетической проблемы вызвало к жизни электропередачу и электропривод. Электрификация же началась тогда, когда оказалось возможным строить крупные электростанции в местах, богатых первичными энергоресурсами, объединить их работу на общую сеть и снабжать электроэнергией любые центры и объекты электропотребления. Техническая сторона электрификации заключалась в разработке многофазных систем, из которых практика сделала выбор в пользу трехфазной системы. Наиболее важными и во всяком

случае новыми элементами этой системы были электродвигатели, действие которых основано на использовании явления вращающегося магнитного поля.

Ранее уже упоминалось об опыте Араго, в котором диск и вращающийся магнит отражали 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 практического применения. Только в 1879 г У. Бейли (Англия) сконструировал прибор, в котором пространственное перемещение магнитного поля осуществлялось с помощью неподвижного устройства путем поочередного намагничивания четырех расположенных по периферии круга электромагнитов. Намагничивание их 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 был подвешен медный диск. 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. С позиции сегодняшнего дня представляется крайне простым осуществление вращающегося поля путем питания электромагнитов в установке Бейли синусоидальными токами с различными начальными фазами. Однако в 80-х гг. XIX в. на это ушло несколько лет работы и поисков многих ученых, среди которых были французский физик Марсель Депре, разработавший в 1883 г. систему синхронной связи двух движений, авторы одной из конструкций индукционных электросчетчиков Борель и Шалленбергер, изобретатель репульсионного двигателя И. Томсон (однофазный двигатель переменного тока с трансформаторной связью между обмотками статора и ротора, применяемый в регулируемых приводах небольшой мощности), американский электротехник Ч. Бредли, немецкий инженер Ф. Хазельвандер и др.

История открытия вращающегося магнитного поля и многофазных систем до крайности запутана. В 90-е гг. XIX в. прошли многие судебные процессы, на которых разные фирмы, купившие патенты изобретателей, пытались утвердить свои права на многофазные системы. Только американская фирма Вестингауз провела более 25 судебных процессов. Однако исчерпывающие и получившие наибольшую известность эксперимен-

тальные и теоретические исследования вращающегося магнитного поля выполнили независимо друг от друга выдающиеся ученые итальянец Галилео Феррарис (1847–1897) и серб Никола Тесла (1856–1943).

Г. Феррарис сделал 18 марта 1888 г. доклад «Электродинамическое вращение, произведенное с помощью переменных токов» в Туринской академии. Н. Тесла принцип двухфазного асинхронного двигателя изложил на конференции в Американском институте электроинженеров 16 мая 1888 г., но первую заявку для получения патента на многофазные системы он подал еще 12 октября 1887 г., т.е. ранее выступления Феррариса. Г. Феррарис был известным в Европе ученым, представлявшим Италию на разных международных выставках и конгрессах. Он разрабатывал теорию переменных токов и умел в очень ясной форме объяснять сложные физические процессы. Вот как им было объяснено явление вращающегося магнитного поля (рис. 2).

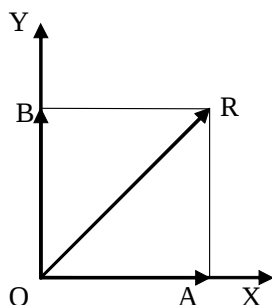


Рис. 2. Схема, представляющая явление вращающегося магнитного поля

Ось X представляет собой положительное направление вектора магнитной индукции, создаваемой одной из катушек, а ось Y – положительное направление поля другой катушки. Для момента вращения, когда индукция одного поля в точке O изображается отрезком OA, а другого – OB, суммарная результирующая индукция изобразится отрезком OR.

При изменении OA и OB точка R перемещается по кривой, форма которой определяется законами изменения во времени двух полей. Если два поля имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе на четверть периода, то геометрическим местом точки R станет окружность. Налицо вращение магнитного поля. Если фазу одного из полей или возбуждающего его тока изменить на 180° , то изменится и направление вращения результирующего поля. Если поместить в это поле снабженный валом и подшипниками медный цилиндр, то он будет вращаться. Позднее син-

хронные двигатели с полым цилиндром получили название двигателей Феррариса. Феррарис предложил для получения двух переменных токов, сдвинутых друг относительно друга по фазе метод «расщепления фаз», при котором искусственным путем создавался сдвиг по фазе при включении в цепи двух взаимно перпендикулярно расположенных катушек фазосмещающих устройств. Модель двухфазного асинхронного двигателя Феррариса хранится в музее города Турина (в статоре 4 катушки, сдвинутые на 90° относительно друг друга, ротор – медный стакан).

В своем теоретическом анализе Феррарис пришел к ошибочному заключению, что аппарат, основанный на этом принципе (асинхронный двигатель со скольжением 50%), не может иметь какого-либо практического значения (так как КПД асинхронного двигателя при этом может быть только ниже 50%), находясь в плену методов «слаботочной техники».

Никола Тесла, один из самых известных ученых в области электротехники, начинавший свою научную карьеру в 80-х гг. XIX в., получил только в области многофазных систем 41 патент. Некоторое время Тесла работал в Эдисоновской компании в Париже (1882–1884), а затем переехал в США. В 1888 г. все свои патенты по многофазным системам Тесла продал главе известной фирмы Джорджу Вестингаузу, который в своих планах развития техники переменного тока (в противовес компании Эдисона) сделал ставку на работы Тесла. Впоследствии Тесла много внимания уделял технике высоких частот (трансформатор Тесла) и идее передачи электроэнергии без проводов. При решении вопроса о стандартизации промышленной частоты Тесла решительно высказался за принятую им для своих опытных установок частоту 60 Гц. Вскоре эта частота была принята в США в качестве стандартной. В отличие от Феррариса Тесла полагал, что многофазные токи следует получать от многофазных источников, а не пользоваться фазосмещающими устройствами. Утверждая, что двухфазная система, являясь минимальным вариантом многофазных систем, окажется и наиболее экономичной, Тесла, а вслед за ним и фирма Вестингауза, основное внимание сосредоточила именно на этой системе.

В синхронном генераторе двухфазной системы Тесла 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. Ротор двигателя также 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 (результат механического переноса в технику переменного тока конст-

руктивных схем машин постоянного тока). Конструкция обмотки ротора, как выяснилось позднее, тоже оказалась неудачной. Неудачным оказался и выбор двухфазной системы токов из всех возможных многофазных систем. Двухфазная система требовала применения четырех проводов на линиях электропередачи вместо двух в установках постоянного и однофазного переменного токов. Фирма Вестингауза построила несколько станций по этой системе, из которой наибольшей по масштабам была Ниагарская электростанция. Но тем не менее встретившиеся технические и экономические трудности задерживали внедрение двухфазной системы в практику.

Вопросы для самопроверки

- 1. Перечислите основные этапы развития вращающегося магнитного поля.*
- 2. Каковы были представления Феррариса о теории переменных токов?*
- 3. Охарактеризуйте конструктивное исполнение двигателя Тесла.*

5.2. Трехфазная система токов и напряжений

В то время как Тесла и его сотрудники пытались усовершенствовать двухфазную систему, в Европе была разработана новая, более совершенная – трехфазная система. Изучение документальных материалов показывает, что в 1887–1889 гг многофазные системы разрабатывались с большим или меньшим успехом несколькими учеными и инженерами (в Америке Ч. Бредли, немецкий инженер Ф. Хазельвандер). Наибольших успехов в развитии многофазных систем добился М.О. Доливо-Добровольский (1862–1919). Он родился в пригороде Петербурга городе Гатчина, а закончил реальное училище в Одессе, где его отец издавал местную газету «Правда». С 1878 г. он учился в Рижском политехническом институте, но закончить обучение в нем ему не удалось, т.к. за участие в студенческих волнениях он был в 1881 г отчислен из института. Завершил образование Доливо-Добровольский в Германии, в Высшем техническом училище города Дармштадта, в котором большое внимание уделялось практическим применениям электричества. В этих благоприятных условиях природное дарование, трудолюбие и изобретательский талант помогли ему быстро выдвинуться в число лучших студентов. В 1884 г. после успешного окончания училища он был оставлен в нем в должности ассистента. Руководство кафедры, высоко оценивая его эрудицию, поручило ему преподавание нового самостоятельного курса по практическому применению электрохимии. Вскоре на Доливо-Добровольского обратил внимание энергичный предприниматель Эмиль Ратенау, возглавивший

только что откупившуюся от эдисоновской компании и ставшую самостоятельной фирму АЭГ (Всеобщая компания электричества). Русский инженер занял должность шеф-электрика фирмы.

Осенью 1888 г. Доливо-Добровольский прочел доклад Феррариса о вращающемся магнитном поле и был крайне удивлен его выводом о практической непригодности индукционного электродвигателя. Усиленная деятельность в направлении создания электродвигателя многофазного тока с ничтожным скольжением привела в необычайно короткий срок к разработке трехфазной электрической системы и совершенной, в принципе, не изменившейся до настоящего времени конструкции асинхронного двигателя. Первым важным шагом, который сделал Доливо-Добровольский, было изобретение ротора с обмоткой в виде беличьей клетки. Он выполнил ротор в виде стального цилиндра и в просверленные по периферии последнего каналы заложил медные стержни. На лобовых частях ротора эти стержни были электрически хорошо соединены друг с другом.

Следующим шагом 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. Вскоре выяснились и другие преимущества трехфазной системы.

Доливо-Добровольский в результате исследования различных схем соединения обмоток сделал ответвления от трех равностоящих точек якоря машины постоянного тока. Таким образом, были получены токи с разностью фаз 120. Сохранив в этой машине коллектор, можно было использовать ее в качестве одноякорного преобразователя. Таким путем была найдена связанная трехфазная система, которая отличалась той особенностью, что требовала для передачи и распределения электроэнергии только три провода. Достоинства трехфазной симметричной связанной цепи подкреплялись другими преимуществами как двигателей, так и вообще трехфазной системы. Она является симметричной, уравновешенной и экономичной (с точки зрения затрат металла на провода линии электропередачи). Таким образом, трехфазная система электрических токов является оптимальной многофазной системой.

Весной 1889 г. был построен первый трехфазный асинхронный двигатель мощностью около 100 Вт. Этот двигатель питался током от трехфазного одноякорного преобразователя и при испытаниях показал вполне удовлетворительные результаты. Вслед за первым одноякорным преобразователем был создан второй, более мощный, а затем началось изготовление трехфазных синхронных генераторов. Уже в первых генераторах применялись два способа соединения обмоток: в звезду и треугольник.

Важным достижением Доливо-Добровольского явилось 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 – кольцевая обмотка была заменена барабанной.

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 асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в несколько раз превышает номинальный, и поэтому включение двигателей мощностью свыше 2–3 кВт уже отражалось на работе других потребителей. Анализ возникших затруднений привел к созданию так называемого фазного ротора, т.е. такого, обмотка которого делается подобно обмотке статора, трехфазной и концы которой соединяются с тремя контактными кольцами, насаженными на вал. С помощью щеток эти кольца соединяются с пусковым реостатом. Таким образом, в момент пуска в цепь ротора включается большое сопротивление, которое выводится по мере возрастания частоты вращения двигателя. Но фазный ротор требовал устройства на валу контактных колец, а это рассматривалось многими электротехниками как недостаток по сравнению с короткозамкнутым ротором, не имевшем 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 до настоящего времени. В статьях и докладах Доливо-Добровольского даются также элементы теории асинхронных машин. Конструктивные же формы созданных им двигателей были настолько совершенны, что не претерпели сколько-нибудь существенных изменений до настоящего времени.

Доливо-Добровольский в своих статьях отмечал, что заслуга практической разработки и технического воплощения систем многофазного тока, безусловно принадлежит фирме АЕГ, что не должно снижать научной ценности открытий профессора Феррариса и Тесла. Трехфазная система не получила бы в первые же годы своего существования быстрого распространения, если бы не решила проблемы передачи электроэнергии на большое расстояние. Но такая электропередача выгодна при высоком напряжении, которое при переменном токе получают при помощи трансформатора. Трехфазная система не представляла принципиальных за-

труднений для трансформирования электроэнергии, но требовала трех однофазных трансформаторов вместо одного при однофазной системе. Такое увеличение числа довольно дорогих аппаратов не могло не вызвать стремление найти более удовлетворительное решение. В 1889 г. Доливо-Добровольский изобрел трехфазный трансформатор. В начале это был трансформатор с радиальным расположением сердечников, затем было предложено несколько конструкций так называемых призматических трансформаторов, в которых удалось получить более компактную форму магнитопровода. Наконец, в октябре 1891 г. была сделана патентная заявка на трехфазный трансформатор с параллельными стержнями, расположенными в одной плоскости. В принципе, эта конструкция сохранилась до настоящего времени. Необходимыми для решения проблемы электропередачи являлись также работы, связанные с выбором схем трехфазной сети. В 80–90-х гг. XIX в. значительное место в электропотреблении занимала осветительная нагрузка, которая часто вносила существенную несимметрию в систему. Кроме того, иногда было желательно иметь в своем распоряжении не одно, а два напряжения: одно – для осветительной нагрузки, другое, повышенное, – для силовой. Чтобы можно было располагать двумя напряжениями в системе (фазным и линейным), Доливо-Добровольский разработал в 1890 г. четырехпроводную систему трехфазной цепи или, иначе, систему с нейтральным проводом. Одновременно он указал, что вместо нейтрального (или нулевого) провода можно использовать землю. Доливо-Добровольский обосновал свои предложения доказательством того, что четырехпроводная трехфазная система допускает определенную несимметрию нагрузки. Для регулирования напряжения в отдельных фазах четырехпроводной системы он 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 электропередачи и асинхронный двигатель в двух его модификациях (с фазным и короткозамкнутым ротором). Из всех возможных конструкций многофазных генераторов получили широкое практическое применение только синхронные 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 электроизмерительной технике. Основное на-

правление его работ совпало с главным направлением в развитии электроэнергетики.

Вопросы для самопроверки

1. Вклад Доливо-Добровольского в развитие двигателя.
2. В чём заключается преимущество трехфазной системы над двухфазной?
3. Что представляла собой «беличья клетка»?
4. Назовите основные элементы трехфазной системы электропитания.

5.3. Первая трехфазная линия электропередачи

Годом рождения электрификации вполне можно считать 1891 г., когда состоялось генеральное испытание трехфазной системы на Международной электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне. Поводом для организации этой выставки явились затруднения обербургомистра Франкфурта в выборе рода тока для центральной электростанции города. Вопрос «постоянный или переменный ток?» был предметом научных дискуссий в течение 80-х гг. XIX в. Авторитетная международная комиссия, собранная по просьбе обербургомистра, тоже не пришла к соглашению и не смогла дать определенных рекомендаций. Поэтому решили организовать международную электротехническую выставку и дать возможность всем желающим лицам и фирмам продемонстрировать свои предложения и технические возможности. Была создана международная испытательная комиссия под председательством немецкого ученого Германа Гельмгольца. В члены комиссии входил и русский инженер Р.Э. Классон. Предполагалось, что комиссия проведет испытания всех предложенных систем и даст ответ на вопрос о выборе рода тока и перспективной системы электроснабжения. Организаторы выставки предложили фирме АЭГ, в которой в то время работал Доливо-Добровольский, передать посредством электричества энергию водопада на реке Неккар (близ местечка Лауфен) на территорию выставки во Франкфурт. Расстояние между этими двумя пунктами составляло 170 км. В Лауфене, в расположении строителей передачи выделялась турбина мощностью около 300 л.с. До этого времени дальность электропередачи, не считая нескольких опытных установок, не превышала 15 км. Правление фирмы АЭГ согласилось осуществить электропередачу, и Доливо-Добровольскому предстояло в течение года спроектировать и изготовить асинхронный двигатель мощностью 75 кВт и трехфазные трансформаторы мощностью 100–150 кВт·А. Двигатели и трансформаторы на такие мощности еще не существовали. Доливо-Добровольский писал по поводу этой задачи: «Ес-

ли я не хотел навлечь на мой трехфазный ток несмываемого 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 на их основе затем развиваться, пошли бы по пути применения однофазного тока».

В августе 1891 г. на выставке зажглись 1000 ламп накаливания, питаемых током от Лауфенской гидроэлектростанции (ГЭС). 12 сентября того же года двигатель Доливо-Добровольского привел в действие декоративный водопад. На лицо была своеобразная энергетическая цепь. Первая трехфазная электропередача представляла собой следующее: на ГЭС в Лауфене энергия, развиваемая турбиной, передавалась через коническую зубчатую передачу на вал трехфазного синхронного генератора (230 кВ·А, 150 об/мин, 95 В, соединение обмоток в звезду). От генератора медные шины передавали ток на распределительный щит. На последнем были установлены амперметры и вольтметры, свинцовые предохранители и токовые реле (максимально-минимальные), воздействовавшие на цепь возбуждения. В Лауфене и Франкфурте находилось по три трехфазных трансформатора. В начале испытаний на каждом конце линии было включено по одному трансформатору мощностью 150 кВ·А каждый с коэффициентами трансформации 154 в Лауфене и 116 во Франкфурте. Поскольку приборов для измерения высокого напряжения не было, вторичное напряжение определяли путем умножения первичного на коэффициент трансформации. Трансформаторы были помещены в баки, наполненные маслом. Трехпроводная линия была выполнена на деревянных опорах со средним пролетом около 60 м. Медный провод диаметром 4 мм крепился на штыревых фарфорово-масляных изоляторах. Интересной деталью линии являлась установка 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 устраивалось трехфазное короткое замыкание посредством простого приспособления, плавкие вставки перегорали, турбина начинала развивать большую скорость, и машинист, заметив это, останавливал ее. На выставочной площадке во Франкфурте был установлен понижающий трансформатор, от которого при напряжении 65 В питались лампы накаливания, расположенные на огромном щите. Здесь же был установлен трехфазный асинхронный двигатель, приводивший в действие гидравлический насос мощностью около 100 л.с. Одновременно Доливо-Добровольский экспонировал трехфазный асинхронный двигатель мощностью около 100 Вт с вентилятором на его валу и двигатель мощностью 1,5 кВт

с сидящим на его валу генератором постоянного тока, который питал лампы накаливания. Оборудование на электростанции было заземлено, как и нейтраль трансформатора. 25 августа 1891 г. официальный пуск линии состоялся. Вся установка сразу же стала работать хорошо. Испытания электропередачи дали следующие результаты: минимальный КПД электропередачи 68,5% (отношение мощности на вторичных зажимах трансформатора во Франкфурте к мощности на валу турбины в Лауфене), максимальный КПД 75,2%, линейное напряжение при испытаниях составило около 15 кВ. Комиссия положительно оценила эти результаты. Электропередача Лауфен-Франкфурт не только продемонстрировала возможности электрической передачи энергии, но и поставила точку в давнем споре. В борьбе «постоянный-переменный ток» победила техника переменного тока. Эта же электропередача убедительно показала, что среди систем переменного тока преимущества имеет трехфазная система. Международная электротехническая выставка и приуроченный к ней международный конгресс электротехников (7–12 сентября 1891 г.) открыли этой системе электрических токов широкий путь в промышленность. Начиналась эпоха электрификации.

Вопросы для самопроверки

- 1. Кто впервые ввёл в эксплуатацию трехфазные линии электропередач?*
- 2. Какие испытания проводились с применением линий электропередачи переменного тока?*

5.4. Возникновение районных электростанций и энергетических систем

Создание трехфазной системы являлось важнейшим этапом в развитии техники. Эта система вывела проблему передачи электроэнергии, а вместе с ней электроэнергетику, из кризисного состояния, которое сложилось в 80 х гг. XIX в. Производительные силы получили новую техническую базу, во многом способствовавшую углублению процесса концентрации и централизации производства электроэнергии, которая 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. Первый в мире эксплуатировавшийся трехфазной электростанцией была Лауфенская. После закрытия Франкфурской выставки эта электростанция перешла в собственность города

Хельбронна, расположенного в 12 км от Лауфена. Она была пущена в 1892 г. На ГЭС были установлены два одинаковых синхронных генератора. Напряжение (фазное) при помощи трансформаторов повышалось с 50 до 5000 В. Электроэнергия использовалась для питания 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 ГЭС 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 преимущественно в Германии.

Известные трудности в развитии электрификации на базе трехфазных систем возникли в связи с тем, что уже раньше в городах были построены электростанции постоянного тока или однофазного переменного, а иногда и двухфазного. Владельцы и акционеры этих станций и электрических сетей всячески препятствовали внедрению трехфазной системы. Некоторым выходом явилось сочетание трехфазной электропередачи с распределением электроэнергии на постоянном токе. Например, в 1893 г. в Боккенгейме (пригород Франкфурта) была сооружена электростанция с двумя трехфазными генераторами (по 150 кВт·А). Напряжение при помощи трансформаторов повышалось с 80 до 700 В, и электроэнергия передавалась на подстанцию, находившуюся в центре промышленного района и удаленную от электростанции на 1,2 км. Большая часть электроэнергии на подстанции преобразовывались 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. ГЭС располагала двумя генераторами мощностью по 250 кВт. От электростанции были проведены две линии генераторного напряжения (2500 В). Первая из них длиной 12 км поставляла электроэнергию для целей освещения, 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 одна из крупнейших фирм – компания «Вестингауз» – настойчиво пыталась развернуть работы по сооружению электростанций и электрических сетей по системе Тесла. Высшим достижением двухфазной системы считалась грандиозная по

тому времени электростанция на Ниагарском водопаде, пущенная в эксплуатацию в 1896 г. Фирме «Вестингауз Электрик» были заказаны три двухфазных генератора по 5000 л.с. каждый с напряжением 2400 В, в другой фирме – гидротурбины по 5150 л.с. В короткий срок были выполнены большие строительные работы, и в ноябре 1896 г. эта электростанция была открыта. Еще в период строительства этой 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 XX в. число агрегатов было увеличено до восьми, а общая мощность ГЭС возросла до 80000 л.с. Пример Ниагарской электростанции показывает, что с первых шагов крупного гидроэлектростроительства дешевая электроэнергия ГЭС получила широкое применение для электрохимических и электротермических процессов (производство алюминия, карборунда, карбида кальция и др.).

Американская фирма «Дженерал Электрик», основной конкурент фирмы «Вестингауз», быстро переориентировалась и в противовес конкурирующей фирме развила бурную деятельность по сооружению трехфазных установок. На этот раз проиграла фирма «Вестингауз». Ниагарская ГЭС со временем была переоборудована в трехфазную. Для переходного периода в любой области техники, и в области электроэнергетики в частности, весьма характерны попытки комбинирования устаревающих и новых технических решений. Так, в течение почти двух десятилетий, начиная с 1891 г., были сделаны попытки «примирить» трехфазные системы с другими системами. 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 отдельным линиям. Попытки спасти устаревающие системы, а вместе с ними и освоенное заводами оборудование, приводили к созданию комбинированных систем. Такими, в частности, являлись 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 заложен 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 предопределена, и уже с 1901–1905 гг. в основном сооружаются трехфазные электростанции. 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 были чаще всего фабрично-заводскими. Перевозка по железным дорогам топлива, особенно его низкокалорийных сортов, обходится дорого. Гораздо экономичнее было сооружать крупные электростанции на месте добычи топлива, на водопаде или 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 гг. XIX в., а в XX в. они стали основой развития электроэнергетики. Самой первой районной электростанцией считают Ниагарскую ГЭС. Мощности районных электростанций быстро возрастали от нескольких десятков тысяч киловатт (до Первой мировой войны) до 100000 кВт (после войны).

Развитие городских электрических сетей делало нецелесообразным существование в одном городе многих мелких электростанций, и они закрывались одна за другой. Электростанции становились крупными предприятиями по выработке электроэнергии. Сети разных станций объединялись, создавались первые энергетические системы. Под энергосистемой понимают совокупность электростанций, линии электропередачи, подстанций и тепловых сетей, связанных общностью режима и непрерывностью процесса производства, распределения и потребления электрической и тепловой энергии. Первое известное объединение двух трехфазных электростанций было осуществлено в 1892 г. в Швейцарии. Две небольших электростанции в Глэдфельдене (120 кВт·А) и Гохфельдене (360 кВт·А) соединялись двухкилометровой линией электропередачи напряжением 5 кВ и питали распределительную сеть завода фирмы «Эрликон» по линии протяженностью 24 км при напряжении 13 кВ. Возбуждение генераторов первой станции регулировалось со щита управления второй. Однако в первое десятилетие после этого опыта объединение электростанций на параллельную работу еще не получило заметного развития. Положение изменилось только с появлением крупных районных электростанций, особенно после 1900 г. Так, в 1905 г. в США уже работали три крупные для того времени энергетические системы: Южно-Калифорнистская, в районе Сан-Франциско и в штате Юта. Первая из этих систем (компания Эдисона) объединяла четыре ГЭС и четыре тепловых электростанций с общей установленной мощностью около 12000 кВт. Сеть этой системы напряжением 2–30 кВ имела общую протяженность 960 км и охватывала 18 городов.

Русские электроэнергетики сумели очень быстро оценить достоинства трехфазной системы. Уже в январе 1892 г. на четвертой Петербургской

электротехнической выставке профессор И.И. Боргман демонстрировал трехфазные машины системы Доливо-Добровольского. На этой выставке работали две трехфазные машины мощностью по 15 кВт. В России первым предприятием с трехфазным электроснабжением был Новороссийский элеватор. Он представлял собой грандиозное сооружение, и задача распределения энергии по его этажам и различным зданиям могла быть наилучшим образом решена только с помощью электричества. Строитель элеватора инженер Шенснович А.И. решил применить только что ставшую известной трехфазную систему. Летом 1892 г. швейцарскому заводу фирмы «Брун-Бовери» были заказаны чертежи трехфазных машин. В следующем 1893 г. элеватор был электрифицирован. Интересно, что все машины изготовлялись в собственных мастерских элеватора. На электростанции, построенной рядом с элеватором, были установлены четыре синхронных генератора мощностью 300 кВт·А каждый. Таким образом, общая мощность электростанции составляла 1200 кВт·А, 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 машины и механизмы. Часть электроэнергии использовалась для освещения.

Представляет интерес электрификация Охтенского порохового завода в Петербурге. Ее организаторы В.Н. Чикалев и Р.Э. Классон решили осуществить передачу и распределение электроэнергии с помощью трехфазных сетей. На ГЭС (река Охта) работали два генератора мощностью 120 и 175 кВт. Оба генератора работали независимо друг от друга, т.к. были построены отдельные линии, но они могли включаться также на параллельную работу. Наибольшая длина передачи составила 2,66 км. Нагрузку составляли 9 электродвигателей, из которых один имел мощность 65 л.с., три – по 20 л.с. и пять – по 10 л.с. Кроме того, два двигателя по 1,5 л.с. были установлены на ГЭС для привода щитовых затворов. Часть электроэнергии для питания дуговых ламп преобразовывалась в электроэнергию постоянного тока. Охтенская установка представляла собою в то время последнее слово техники. Ее основной создатель инженер Р.Э. Классон, дал прогрессивное решение задачи централизованного электроснабжения промышленного предприятия. Первой в России электропередачей значительной протяженности была установка на Павловском прииске Ленского золотопромышленного района в Сибири. Электростанция была построена в 1896 г. на реке Ныгра. На ней были установлены трехфазный генератор 98 кВт, 600 об/мин, 140 В и трансформатор соответствующей мощности, повышающий напряжение до 10 кВ. Электроэнергия передавалась на прииск, удаленный от электростанции на 21 км. На прииске для привода водоотливных установок использова-

лись трехфазные асинхронные двигатели мощностью 6,5–25 л.с. (напряжение 260 В). С 1897 г. началась электрификация крупных городов (Москва, Петербург, Самара, Киев, Рига, Харьков и др.).

Первой районной электростанцией в России была небольшая ГЭС «Белый уголь» (вблизи г. Ессентуки), построенная в 1903 г. Эта электростанция по четырем воздушным линиям трехфазного тока протяженностью 6–20 км питала города минераловодческой группы. Единственной крупной районной электростанцией дореволюционной России была станция «Электропередача» в г. Богородске (ныне г. Ногинск), сооруженная на средства «Общества электрического освещения» в 1886 г. Руководителем строительства станции и ее сети был Роберт Эдуардович Классон (1868–1926). На станции было установлено три турбогенератора по 5000 л.с., 1500 об/мин, 6600 В, 50 ГЦ. Напряжение повышалось с помощью трансформаторной группы до 70 кВ. Линия передачи Богородск – Москва имела протяженность более 70 км, и в конце нее в Измайлове 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. Вторая из двух дореволюционных небольших электроэнергетических систем 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. Богородская электростанция (ныне ГРЭС имени Классона), 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 окончания этой войны крупные районные электростанции стали основным звеном плана электрификации России.

Вопросы для самопроверки

- 1. Расскажите о создании первой трехфазной электростанции. Что она собой представляла?*
- 2. Что послужило толчком к созданию районных электростанций?*
- 3. Что представляла собой ГЭС, построенная в Калифорнии в 1893 г.?*
- 4. Что такое «комбинированные» системы постоянного тока?*
- 5. Где и когда были сооружены первые районные электростанции?*

5.5. Развитие электропривода, электрического транспорта и электротехнологии

Как известно, одними из самых распространенных в промышленности являются механические процессы. Поэтому в 70–80 гг. XIX в. начинает проявляться стремление электрифицировать эти процессы, т.е. осуществить электрический привод различных исполнительных механизмов. Однако до начала 90-х гг. XIX в. 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.

Коренным образом положение изменилось в связи с изобретением асинхронного двигателя. В достаточно короткий срок этот тип двигателя занял доминирующее положение в системе электропривода промышленных предприятий. Одним из важнейших преимуществ асинхронного двигателя перед двигателями постоянного тока является отсутствие у них коллектора. Чрезвычайная простота асинхронного двигателя, особенно с короткозамкнутым ротором, его надежность и невысокая стоимость позволяют установить в любом цехе сотни и тысячи таких двигателей при небольшом обслуживающем персонале. Они могут выполняться в герметических корпусах, и, следовательно, их можно использовать в тяжелых условиях: в атмосфере повышенной влажности, взрыво- и пожароопасных средах и т.п. Существенным недостатком двигателей является трудность регулирования частоты вращения. Поэтому до настоящего времени очень велик удельный вес регулируемых машин постоянного тока в системах промышленного электропривода.

Основным типом асинхронных двигателей большой мощности в 90-х гг. XIX в. и в начале XX в. оставался двигатель с фазным ротором. Он позволял в случае необходимости регулировать частоту вращения при помощи реостатов, хотя при этом имели место значительные потери мощности. Электрификация вытеснила из системы промышленного привода паровую машину.

Практически развитие электропривода происходило двумя путями. Первый, наиболее типичный, – замена паровых двигателей, работавших на трансмиссию. Он не исключал тяжелых производственно-гигиенических условий, определявшихся наличием трансмиссий. Второй путь – эпизодическое применение одиночного электропривода. Последнее имело место, как правило, только в случае крупных ответственных исполнительных механизмов, предъявлявших специфические требования к приводному двигателю (привод кранов, прокатных станов и пр.). Но уже в

конце 90-х гг. XIX в. практика наглядно убеждала в преимуществах индивидуального электропривода. Он 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 электродвигателя.

В 70-х и особенно 80-х гг. XIX в. проводилось много работ по применению электричества на транспорте. Так называемые конно-железные дороги уже не удовлетворяли возросших потребностей городского населения, а применение парового городского транспорта оказалось неприемлемым вследствие дыма и копоти. Реальная возможность для проведения опытов по электрификации транспорта появилась после изобретения генератора Грамма.

Во всех случаях, когда электроэнергия для питания тягового двигателя генерировалась аккумуляторной или 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 одном экипаже или судне. 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 разработке способов экономичной передачи электроэнергии от места генерирования к движущемуся вагону и т.п.

Система автономной тяги, однако, не была полностью отвергнута; усовершенствование аккумуляторов позволило устраивать систему автономной электротяги, 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). Электроэнергия по отдельному контактному рельсу передавалась к двигателю небольшого вагона, напоминавшему собой современную аккумуляторную тележку (электрокару). 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 проведены Ф.А. Пироцким. В августе 1880 г. он осуществил пуск электрического трамвая на опытной линии в районе Рождественского парка конной железной дороги в Петербурге.

Питалась эта линия от небольшой электростанции, построенной в парке, с генератором мощностью 4 л.с., а позднее 6 л.с. Под трамвайный электровагон был приспособлен двухъярусный вагон конной железной дороги, вес которой с пассажирами составлял 6,5–7,0 т. К раме вагона был подвешен электродвигатель, приводивший в движение ведущую ось через двухступенчатую зубчатую передачу. Схема, предложенная Пироцким, некоторое время применялась для питания трамвайной сети и за рубежом. Она была достаточно проста и давала возможность обойтись без третьего рельса, затруднявшего уличное движение и 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, предложенного 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. 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.

На электрическом транспорте почти исключительное применение получил постоянный ток, обеспечивающий надежную работу тяговых электродвигателей и регулирование скорости. Поэтому по мере развития техники переменного тока пришлось сооружать преобразовательные подстанции. 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 двигателя и генератора постоянного тока с общим якорем. Одноякорный преобразователь имеет ряд преимуществ перед двигатель-генераторной установкой (снижение на 30–40% массы, значительная экономия места, высокий КПД). Они в 90-х гг. XIX в. и начале XX в. получили очень широкое распространение, особенно в тяговых установках. Однако позднее, уже в 20-х гг. XX в., они начали вытесняться ионными, а последнее время тиристорными преобразователями. Централизованное производство электроэнергии позволило в широких масштабах приступить к электрификации 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 круп-

ных промышленных центрах. Значительно увеличить скорость и удобство пассажирских перевозок удалось путем сооружения метрополитенов (надземных и подземных железных дорог). Слово «метрополитен» в буквальном переводе означает «столичный», т.е. предназначенный для столиц. В 1893 г. была предпринята попытка постройки большой надземной электрической железной дороги в Берлине, которая проектировалась В. Сименсом еще в 1879 г. Рельсы этой железной дороги были уложены на эстакаде, протянувшейся вдоль широких улиц. Другая надземная железная дорога, соединившая ряд промышленных городов от Эберфельда 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 подходящей для внешнего вида улиц, увеличения пропускной способности, уменьшения шума и прочее оказалась подземная железная дорога. Подземные дороги с паровой тягой строились еще до 90-х гг. XIX в. (например, метрополитен в Лондоне был построен в 1860–1863 гг. и переведен на электротягу в 1890 г). Одной из первых подземных железных дорог, которая сразу строилась как электрическая, явился метрополитен в Будапеште (1896).

Вслед за первыми опытами электрификации городского транспорта уже в 90-х гг. XIX в. 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 распределить мощность двигателей по длине поезда (так называемые мотор-вагонные секции), что позволяет увеличить общий вес поездов, а также скорость даже при коротких длинах перегонов.

Развитие автономного электротранспорта нашло свое продолжение в появлении теплоэлектрической тяги. Этот вид транспорта, на котором сохраняются все преимущества электротяги при первичном тепловом двигателе (дизель), открывал чрезвычайно большие возможности. Впервые теплоэлектрическая тяга была осуществлена в 1903–1904 гг. для привода нефтеналивных барж «Вандал» и «Сармат», построенных Сормовским заводом. В дореволюционной России 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

электрификация участка железной дороги на Сурамском перевале (проект был осуществлен после Октябрьской революции). Теплоэлектрическая тяга на железных дорогах в дореволюционной России практически не получила никакого распространения. Единственной областью применения электротяги в России был трамвай. С 1892 по 1900 гг. трамвайное движение было открыто в 12 городах России. Всего до революции в России действовало 36 трамвайных предприятий в 35 городах.

Громадное значение в развитии производительных сил сыграли новые отрасли промышленного производства, появление которых обуславливалось применением электроэнергии в качестве основного технологического фактора – это промышленная электрохимия и электротермия. Промышленная электрохимия зародилась вместе с гальванотехническими мастерскими и предприятиями по производству электролитическим путем кислорода и водорода. Опыты по применению электродуговых печей для плавки руд, металлов и других веществ начались еще в конце 40-х гг. XIX в., но лишь в 1878 г. Сименсу удалось создать такую конструкцию дуговой печи, которая могла использоваться в промышленном производстве.

Чтобы оценить значение электротермии в конце XIX в., 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 электроэнергию. Вслед за металлургией алюминия начинает развиваться ряд других электротермических производств. В конце XIX в. был найден способ получения карборунда. Тогда же был разработан метод получения карбида кальция, который стал употребляться в больших количествах для выработки ацетилена. Позднее были изобретены и усовершенствованы различные конструкции электрических печей для производства высококачественных сталей.

Важной областью применения электроэнергии явилась электрическая сварка. Еще в конце 60-х гг. XIX в. были проведены опыты использования электрического тока для сварки металлов. На Парижской выставке 1867 г. демонстрировался способ контактной сварки: электрический ток пропусклся через два металлических предмета, плотно приложенных друг к другу и имевших соприкосновение в нескольких точках. Однако этот метод вследствие своего несовершенства не получил тогда практического распространения. Другим направлением в области электросварки явилось использование 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 или графитовым электродом, а другой – со свариваемым металлом. В зону электрической дуги вводился металлический стержень, который расплавлялся, застывал и сваривал предметы. Бенардос внес различные усовершенствования в свой метод, в частности, он указал, что вместо угольного электрода можно использовать и 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 отливку металлов и электрическое уплотнение металлических отливок, в основу которых, как и в основу метода Бенардоса, было положено явление электрической дуги. Свариваемое металлическое изделие соединялось с одним полюсом источника электроэнергии, а с другим – металлический стержень, закрепленный в «плавильнике». Электрическая дуга, появляющаяся между металлическим стержнем и свариваемым предметом, расплавляет металл, и поверхность обрабатываемого предмета соединяется (заполняется) 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» получили широкое применение в России, и в особенности на заводах Германии, Франции и Англии. 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, проникла в сельское хозяйство, быт, медицину. Этот процесс углублялся и расширялся, электрификация принимала массовый характер. Все основные технические устройства, предназначенные для производства, распределения и использования электроэнергии были предложены и доведены до промышленных масштабов применения пионерами электроэнергетики в разных странах. Потребность в произ-

водстве больших количеств электроэнергии для электрификации оказала влияние на всю первичную энергетику: теплоэнергетику и гидроэнергетику.

Вопросы для самопроверки

1. Что вы знаете об электрификации транспорта? Где и когда появился электротранспорт?
2. Какие изменения произошли в промышленности в 80-х гг. XIX в.?
3. Расскажите о достоинствах АД перед двигателями постоянного тока?
4. Как проходило развитие электропривода в конце XIX в.?
5. В каких областях науки и техники применялось электричество в конце XIX столетия?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веселовский О.Н., Шнейберг Я.А. Энергетическая техника и ее развитие. М.: Высш. шк., 1976.
2. Веселовский О.Н., Шнейберг Я.А. Очерки по истории электротехники. М.: Изд-во Моск. энерг. ин-та, 1993.
3. Веников В.А., Путятин Е.В. Введение в специальность. М.: Высш. шк., 1988.
4. Симоненко О.Д. Электротехническая наука в первой половине XX века. М.: Наука, 1988.
5. Электрификация СССР/ под ред. П.С. Непорожного, М.: Энергия, 1970.
6. Люди русской науки (очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники) / под ред. И.В. Кузнецова, М.: Наука, 1965.
7. Глобальная энергетическая проблема / под ред. И.Л. Иванова. М.: Мысль, 1985.
8. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1995.