

Министерство образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В.Плеханова  
(технический университет)

А.С.СОЛОВЬЕВ, А.Е.КОЗЯРУК

# ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ В РОССИИ

*Учебное пособие*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2000

УДК 620.09(075.80)

**ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРО-  
МЕХАНИКИ В РОССИИ: Учебное пособие / [А.С.Соловьев], А.Е.Козярук;** Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 2000. 104 с. ISBN 5-94211-015-8

Основная заслуга в подготовке данного пособия принадлежит выдающемуся педагогу и талантливому инженеру – Александру Сергеевичу Соловьеву, посвятившему всю свою жизнь становлению и развитию горной электромеханики и воспитанию высококвалифицированных специалистов для многих отраслей промышленности.

В пособии излагаются вопросы исторического развития электротехники, электроэнергетики и электромеханики в России, связь этого процесса с развитием мировой электроэнергетики.

Пособие предназначено для студентов специальности 180400 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» и может быть полезно для преподавателей, читающих курсы, связанные с развитием электротехники и электромеханики.

Библиогр.: 25 назв.

Научный редактор к.т.н. *Т.О.Россо*

ISBN 5-94211-015-8

© Санкт-Петербургский горный  
институт им. Г.В.Плеханова, 2000 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

История вообще, как и история отдельных направлений человеческого прогресса, неисчерпаема. Ее начало теряется в глубине веков, когда еще отсутствовала письменность, а сохранившиеся предметы материальной культуры немногочисленны. Неизвестно, когда и где появилось такое фундаментальное изобретение как колесо. Кто и где изобрел компас?

История бесконечна, она продолжается и сейчас. Мы являемся современниками и свидетелями многих изобретений и открытий, которые вносят и еще внесут много изменений в материальную культуру и мировое знание. Назовем такие разработки, как полупроводники, интегральные схемы, радио и телевидение, атомная энергетика и разработка МГД-генераторов. Это тоже история – история наших дней.

Развитие электротехники и электроэнергетики связано с работами многих крупнейших ученых и изобретателей. Их имена вошли не только в историю, но и быт в виде названных в их память единиц измерения. О многих из них написаны книги, брошюры, статьи.

Преподавание истории развития электроэнергетики и электромеханики, как и любого другого предмета, встречает ряд трудностей. Это огромный объем литературы, которую надо обработать, обобщить и попытаться довести до слушателей в ограниченное циклом лекций время. Что и как надо читать? Изложим по этому поводу точку зрения авторов.

Особенность курса заключается в том, что из многих дисциплин, литературы и средств массовой информации уже известен ряд

имен ученых и изобретателей в области электротехники, хотя эти знания могут быть отрывочными. Очень часто в литературе отражаются лишь наиболее эффектные моменты, в то время как другие достижения, сыгравшие в развитии науки и техники не менее существенную роль, мало известны.

Другая особенность заключается в том, что слушатели к моменту чтения курса не знают существа сделанных изобретений, особенно в тех случаях, когда дисциплина читается на младших курсах.

Учесть эти особенности в пособии возможно лишь при его существенном расширении. Поэтому данное пособие во многом ориентировано на преподавателей, начинающих чтение дисциплины. В этом авторы согласны с О.Н.Веселовским и Я.А.Шнейбергом, написавшими учебное пособие «Энергетическая техника и ее развитие» (М.: Высшая школа, 1976).

Изучением законов развития природы, человеческого общества и мышления занимается философия. В развитии электротехники и электроэнергетики достаточно отчетливо проявляются основные законы развития, такие как противоречивость открытий, цикличность развития, когда одни и те же вопросы приходится решать неоднократно на разных ступенях развития техники и знания. На эти обстоятельства следует обращать внимание слушателей. Не менее важно показать, как новые изобретения открывают дальнейшие пути развития техники и в то же время требуют решения новых, еще более сложных задач.

Безусловно, традиционная особенность изложения курсов истории – тяготение к фактологическому изложению, свойственна и этому пособию, но авторы старались в виде отдельных разделов или ремарок обратить внимание читателя на проявление в конкретных фактах общих законов развития.

## ВВЕДЕНИЕ

«Научно-технический прогресс не принесет счастья, я есл, я оня не будет я до полняться я чрезвычайная глубок, мя, измен, емся о, альной, я нравственной я, якультурной, зн, я чело в е с т в а . я Внутреннюю ояду. овную о, знъя людей, я внутренн, ея , мпульсив, . я акт, вност, я труднейя всего я прогноз, ровать, яая, менно я о т я з о г я з а в, с, т я в я к о - н е ч н о м у т о г е я т, б е л ь, я я п а с е н, я е л о в е ч е с т в а » я я

А.Д.Сахаров, М. р.результат  
 века  
 «Вопросы философии», 1989 г. № 1

Электромагнитные явления стали известны человечеству с первых шагов его существования. Это общеизвестные явления электризации под действием атмосферного электричества, при использовании меха животных (а охота была одной из первых видов деятельности человека) или некоторых камней. Издавна были известны и магнитные явления.

Само название «электричество» происходит от греческого слова электрон – янтарь. Происхождение названия «магнит» объясняется по-разному. По утверждению древнегреческого философа Платона (427–347 гг. до н.э.), это слово происходит от греческого *magnetis lithos* – камень из древнегреческой провинции Магнезии. Римский писатель и ученый Плиний (23–79 гг.) в своей «Естественной истории» ссылается на легенду о пастухе Мегнесе, пасшем свой стада у подножия горы на острове Крит, близ которой были разбросаны камни, притягивавшие железные гвозди его сандалий и наколочник посоха.

На протяжении истории человечества электромагнитные явления из явлений сложных, загадочных и таинственных стали широко известными, получили широкое применение, стали одной из основ развития человечества.

К.Маркс назвал электричество более опасным врагом старого строя, «чем все заговоры Бланки» (Луи Огюст Бланки (1811–1881) – сторонник заговорщицкой тактики восстания, уничтожения капита-

листической эксплуатации путем захвата власти кучкой революционных заговорщиков).

Говорить о полезности электромагнитных явлений для человеческой деятельности не имеет смысла, Это – очевидно. Значительная часть энергии передается и используется в виде электрической энергии. Практически все современные системы передачи и обработки информации построены на основе электротехнических устройств. Большинство машин и механизмов в промышленности, на транспорте, в быту используют электрические устройства. Даже там, где применяются другие источники энергии (двигатели внутреннего сгорания, паровые или газовые турбины, ядерная энергия), электроэнергия применяется либо для управления установками, либо как элемент силовой цепи. В этом случае выполняется преобразование механической или тепловой энергии в электрическую и передача ее для дальнейшего использования в электротехнических устройствах.

Базой для такого широкого применения послужил ряд достоинств электрической энергии.

1. Легкость производства, точнее получения электроэнергии из других видов.
2. Простота передачи электроэнергии.
3. Легкость дробления электроэнергии в места потребления; отбора от потока энергии нужной доли.
4. Простота преобразования электроэнергии в другие виды: тепловую, механическую; электрохимические превращения, связанные с электрическими свойствами материи.

*Специальность 180400 имеет название «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Что такое «электропривод»? Это сочетание двух положительных качеств – удобство передачи и распределения энергии между потребителями и удобство превращения ее в механическую. Первый учебник по электроприводу, написанный проф. С.А.Ринкевичем, имел очень выразительное название «Электрическое распределение механической энергии», т.е. электропривод – это та область науки, которая связана с электромеханическими преобразованиями. Теоретическое изучение и практическое применение этих преобразований является содержанием электромехани-*

ки, как одной из областей науки. *Электромехаником является тот, кто занимается теорией и практикой этих преобразований.*

5. Производство, передача и преобразование электроэнергии сопровождается сравнительно небольшими потерями, т.е. имеет высокий КПД. КПД электрических генераторов, двигателей, трансформаторов, преобразователей заметно выше, чем у гидро- и пневмодвигателей.

6. Электричество дает возможности управления потоками энергии и, следовательно, технологическими процессами. Сейчас практически вся автоматика – это электроавтоматика. Вся вычислительная техника – это электротехнические устройства. Системы связи, передачи и обработки информации в основном строятся на базе электротехнических устройств. Скорость передачи информации и ее обработки в электротехнических устройствах выше, чем в других устройствах.

7. Электрические явления присутствуют и в организме человека. Луиджи Гальвани (1737–1798) в 1791 г. опубликовал «Трактат о силах электричества при мышечном движении». В 1803 г. А.Т.Болотов по результатам своих работ издал в Петербурге книгу «Краткие и на опытности основанные замечания об электрицизме и о способности электрических машин к помощи от разных болезней». Эти работы по воздействию электричества на органическую ткань нашли подтверждение и развитие в электротехнических способах воздействия на человеческий организм (лечение ТВЧ, электрокардиостимуляторы, дефибрилляторы, но и электрошок и электрический стул).

8. Электричество – очень концентрированная энергия:

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1000 \text{ Дж/с} \times 3600 \text{ с} = 3600000 \text{ Дж};$$

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 102 \text{ кг}\cdot\text{м/с} \times 3600 \text{ с} = 367000 \text{ кг}\cdot\text{м} \text{ (эквивалентно поднятию 367 т на высоту 1 м)}.$$

История развития науки и практики в области электричества и магнетизма знает много знаменитых имен, вошедших не только в исторические документы, но и в нашу повседневность в виде электрических единиц. В области электричества – это Кулон, Ампер, Ом, Вольт, Сименс, Фарадей, Генри; в области магнетизма – Гаусс, Вебер, Максвелл, Эрстед, Тесла, Гильберт. В других областях – Герц, Джоуль, Уатт.

Русские электротехники внесли огромный вклад в науку о электричестве и его практическом применении.

Мы все время говорим об электричестве и магнетизме, хотя слово электричество преобладает. Можно ли вообще не упоминать магнитные явления? Известно, что электрические и магнитные процессы взаимосвязаны и не могут быть разделены. Они представляют единый электромагнитный процесс, хотя в ходе исторического развития науки это стало известно не сразу. Если пренебречь одной стороной, может вообще потеряться физический и практический смысл. Например, ЭДС, наводимая в проводнике, движущемся в магнитном поле,

$$E = BLV,$$

а сила, действующая на проводник с током в магнитном поле,

$$F = BIL.$$

Поделив почленно, получим

$$E/F = V/I \quad \text{или} \quad FV = EI.$$

Последняя формула говорит о возможности и количественных соотношениях преобразования электрической энергии в механическую и обратно, хотя из первых двух формул видно, что эти преобразования происходят в магнитном поле.

Технический прогресс во всех видах человеческой деятельности привел к тому, что мощности, которыми располагает человечество, и его воздействие на окружающую среду стали соизмеримыми с природными воздействиями. Уже в начале этого века стали говорить об антропогенном воздействии на природу, возникла экология как наука о защите окружающей среды. Человеком созданы огромные водохранилища, карьеры. Металлургические, химические предприятия, автотранспорт производят гигантские выбросы вредных веществ в водную среду и атмосферу. Мощные ядерные взрывы приводят к скачкам в радиационном фоне, а атомные станции являются потенциальной угрозой для огромных районов и даже континентов.

В этих условиях одной из закономерностей развития общества становится возрастание роли человеческого фактора.



В начале века введение механизации и автоматизации производства, конвейеризации привели к тому, что роль человека в процессе производства стала снижаться. Возникла задача защиты человека от самостоятельно действующей техники. Появилась иллюзия, что в будущем будет достаточно только «нажать кнопку».

Сейчас человек стал управлять огромными техническими устройствами и системами, громадными энергетическими потоками. Некомпетентность в управлении колоссальными мощностями и быстродействующими автоматическими устройствами может привести к огромным, иногда глобальным, разрушительным последствиям. Достаточно вспомнить гибель судна «Адмирал Нахимов», аварию на Чернобыльской АЭС. Примеры можно продолжить.

Однако причиной этих и других трагедий является не только некомпетентность, но и недобросовестное, безответственное отношение к делу. В обществе появилась опасная тенденция «законне-послушания», которая начала распространяться и на законы природы, в частности, на законы физики. Все это уже характеристика морального, нравственного уровня специалиста. Поэтому в процессе обучения оцениваются не только знания, но и добросовестное отношение студентов к процессу обучения.

Современное состояние техники характеризуется очень быстрым развитием. Смена поколений техники в ряде отраслей в несколько раз опережает смену поколений работников. Примером может служить развитие вычислительной техники и расширение области ее применения. Поэтому одной из задач обучения является не только овладение профессиональными навыками, но и воспитание восприимчивости к социально-экономическим и научно-техническим нововведениям, способности к самообразованию.

## **РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ В МИРЕ И В РОССИИ ДО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЫ XIX ВЕКА**

Научные работы в области электричества начались вместе с научными работами вообще. Ярким было открытие электрических и магнитных явлений. Первой научной работой в этой области стало

сочинение Уильяма Гильберта (1554–1603) в 1600 г. «О магнитах, магнитных телах и о большом магните – земле». Гильберт разделил все тела на «электрические», которые можно наэлектризовать, и «неэлектрические», которые не поддаются электризации. К последним Уильям Гильберт отнес металлы, человеческое тело.

Сомнения в этом уже в XII веке высказали Кабео в работе «Магнитная философия» (*Philosophia Magntica Ferrara*, 1629), а также Отто Герике, Стефан Грей и Георг Вильгельм Рихман. Уильям Гильберт знал о существовании наэлектризованных тел, но считал, что «все электрические тела притягивают все и никогда ничего не отталкивают и не отгоняют».

Для изучения электричества начинается создание электростатических машин. Обычно это шары из диэлектрика (стекло, сера), вращающиеся на валу, и натираемые руками. В 1650 г. губернатор Магдебурга Отто Герике изготовил шар из серы «величиной с детскую голову», укрепленный на деревянном штативе. Это была простейшая электростатическая машина.

Французский физик Шарль Франсуа Дюфе (1698–1739) высказал гипотезу о двух родах электричества: получаемое при натирании стекла, кварца, шерсти он назвал «стеклянным», а от натирания смолы или янтаря – «смоляным». При этом «тело, наэлектризованное стеклянным электричеством, отталкивает все тела со стеклянным электричеством и, наоборот, оно притягивает все тела со смоляным электричеством».

На этом этапе существовало мнение о том, что электрические и магнитные явления не связаны между собой. Однако, сходство между механическим взаимодействием магнитных полюсов и зарядов привело к попытке объединить эти явления. Наряду с существованием зарядов возникло учение о магнитных массах, как об особой субстанции. Способность электрических зарядов перетекать от одного тела к другому была отражена в гипотезе о существовании особой электрической (а затем и гальванической) жидкости.

В 1745 г. Клейст в Германии и голландский профессор из Лейдена Питер ван Мушенбрук изобрели лейденскую банку, т.е. конденсатор, что позволило накапливать заряды. Мушенбрук первым ощутил электрический удар при работе с конденсатором.

В присутствии французского короля аббат Ноле построил в цепь 180 гвардейцев, причем первый из них держал лейденскую банку, а последний коснулся ее проволокой. Удар почувствовали все. Так появился термин «электрическая цепь».

В России развитие электротехники как науки связано с работами М.В.Ломоносова. Эти работы и работы ряда других ученых – членов Российской академии наук заложили основу русской электротехнической школы.

Первые труды в области электротехники, выполненные в России, принадлежат М. В. Ломоносову (1711–1765) и профессору Георгу Вильгельму Рихману (1711–1753).

*Георг Вильгельм Рихман* родился в Ревеле, учился в Ревеле, Галле, Иене. С 1735 г. он – студент «физического» класса при Петербургской академии наук. Ломоносов и Рихман изучали электрические атмосферные явления, для чего строили «грозовые машины». Это по сути конденсатор (лейденская банка), который заряжался под действием атмосферного электричества.

Рихман обратил внимание на сходство электрических явлений в атмосфере и в лабораторных условиях. Ему принадлежит работа «Рассуждения, утвержденные на опыте, о сходстве искусственного электричества с электричеством естественным, порожденным молнией, и о способе отвода молнии».

Рихман первым поставил и в 1753 г. решил (на уровне того времени) задачу электрических измерений. Он создал первый электрометр, в котором льняная нить отклонялась от металлического стержня и фиксировался угол отклонения (указатель электричества). Рихман вообще стремился давать явлениям не только качественные, но и количественные оценки. Он создал первый калориметр. Рихман подходит к понятию электрической емкости. Он пишет: «Электричество распределяется не пропорционально массам, а скорее пропорционально поверхностям, ибо к большей поверхности может приставать большее количество возмущенной электрической материи, чем к меньшим».

Гипотезы Ломоносова и Рихмана, а еще ранее английских ученых Уолла и Исаака Ньютона о сходстве атмосферного и статического электричества были подтверждены опытами американского

ученого Бенджамина Франклина и экспериментальными исследованиями Ломоносова и Рихмана. В 1753 г. 26 ноября Ломоносов изложил свои наблюдения в речи, прочитанной в Академии наук, «Слово о явлениях воздушных от электрических сил происходящих». Ломоносов предложил теорию возникновения грозы от образования электрических зарядов между восходящими и нисходящими потоками воздуха. Раньше, чем Майкл Фарадей и Джеймс Клерк Максвелл, Ломоносов указал на связь световых и электрических явлений. Рассматривая свечение воздуха, вызванное электрическими разрядами при пониженном давлении, Ломоносов высказал мысль об электрической природе северного сияния. Изучая вместе с Рихманом грозовые явления, Ломоносов указал на необходимость громоотводов. Рихман был первым ученым, погибшим при исследованиях в области электротехники (26 июля 1753 г.).

Говоря о Ломоносове, нельзя не сказать о роли Российской академии наук и ее ученых в области электротехнической науки. На первых порах Российская академия наук пригласила ряд ученых, заложивших основу научных исследований электрических явлений. Они же были и первыми учителями русских ученых. По инициативе профессора Г.В.Крафта в Петербургской академии наук был создан Физический кабинет. В 40-х годах XVIII века в кабинете было около 400 приборов из них 180 – по механике, 101 – по оптике, 40 – по магнетизму. С 1744 г. Физический кабинет возглавил Рихман.

*Франц Ульрих Теодор Эпинус* (1724–1802) был приглашен в Петербургскую академию из Ростокского университета в 1757 г. В 1759 г. Эпинус написал работу «Опыт теории электричества и магнетизма». Эпинус вводит понятие об электрических притяжениях и отталкиваниях, т.е. он начинает работы по обоснованию электрического поля. Он, также как и Генри Кавендиш (1731–1810), указал на зависимость сил взаимодействия зарядов от расстояния, но точные количественные соотношения определил Шарль Огюстен Кулон (1736–1806) в 1785 г. Характерно, что Эпинус, как и Бенджамен Франклин, не знал о существовании положительных и отрицательных зарядов. Вместо этого Эпинус оперирует понятиями «недостатка» и «избытка» электричества в телах. (Сравним с современным понятием «дырка» в полупроводниках).

*Георг Фридрих Паррот* (1767–1852) получил образование в Штутгартской Академии. В 1800 г. был приглашен профессором физики в только что открытый Юрьевский университет. В 1826 г. был приглашен в Петербургскую академию наук. Паррот – основатель теории гальванических элементов. Учеником Паррота был Э.Х.Ленц, в трудах которого на первой стадии заметно влияние Паррота.

*Ханс Иоган Дитрих Гротгус* (1785–1822) – уроженец Виленской губернии, обучался в Лейпциге, Париже, Риме. Гротгус – создатель первой ионной теории электролитических явлений, положивших начала теории электролитической диссоциации.

*Василий Владимирович Петров* (1761–1834), сын приходского священника, родился в г.Обоянь Курской губернии. Обучался в Харькове, затем в Петербургской учительской семинарии. Трудовую деятельность начал в Колывано-Воскресенской (Барнаульской) горной школе в качестве учителя математики и физики (1788). В 1793 г. В.В.Петров стал преподавателем Петербургского медико-хирургического училища, которое в 1795 г. было переименовано в Военную медико-хирургическую академию, где В.В.Петров получил должность экстраординарного профессора физики и математики.

С 1807 г. В.В.Петров – адъюнкт Академии наук по кафедре экспериментальной физики, с 1809 г. – экстраординарный академик, с 1814 г. – ординарный академик и заведующий Физического кабинета. Одновременно В.В.Петров заведовал кафедрой физики Медико-хирургической академии, а также читал лекции в Академии свободных художников и 2-м Кадетском корпусе.

В.В.Петров известен рядом работ в области гальванических элементов, теории электризации тел. В 1600 г. Уильям Гильберт разделил все тела на «электрические», т.е. электризующиеся при трении, и «неэлектрические», которые трением наэлектризовать нельзя. Между прочим, «электрические» тела по Гильберту – это диэлектрики, а «неэлектрические» – проводники. Правда, в 1713 г. Стефан Грей показал, что можно наэлектризовать и проводник, но это было воспринято с недоверием. В.В.Петров поставил ряд безупречных опытов, в которых он предусмотрел все возможности стекания зарядов с проводника в землю и достиг электризации этих тел. Свой метод В.В.Петров назвал «стега-

нием». Результаты работы В.В.Петров опубликовал в 1804 г. в книге «Новые электрические опыты профессора физики Василия Петрова, который опытами доказывает, что изолированные металлы и люди могут соделываться электрическими от трения, наипаче же стегания их шерстью, выделанных до нарочитой мягкости мехов и некоторыми другими телами, а также особливые опыты, деланные различными способами для открытия причины электрических явлений». Этим было установлено, что различия между электризацией проводящих и непроводящих тел в природе нет.

Когда Алессандро Вольта (1745–1827) в 1799 г. составил первую гальваническую батарею – вольтов столб, В.В.Петров в лаборатории Медико-хирургической академии провел цикл исследований с гальваническими батареями. О результатах исследований он написал в 1803 г. книгу «Известие о гальвано-вольтовских опытах, которые производил профессор физики Василий Петров посредством огромной наипаче батареи, состоящей иногда из 4200 медных и цинковых кружков и находящейся в Санкт-Петербургской Медико-хирургической академии». Батарея состояла из 2100 элементов и создавала напряжение 1700 В.

Имея источник с большим напряжением и достаточной мощностью, В.В.Петров начинает работы в области электрохимии. Он показал, что горение есть реакция окисления, для которой нужен кислород, а также проводил много опытов по нагреву тел в «безвоздушном месте», где тела накаливались, но не сгорали. Это в дальнейшем использовал А.Н.Лодыгин, создавая лампы накаливания с угольной нитью, помещенной в вакуум.

В.В.Петров проводил изучение поведения цепи при сближении электродов в вакууме, масле, воздухе. Это дало возможность открыть свечение за счет электрического разряда в вакууме, изучить электрические разряды в жидкости, открыть электрическую дугу в воздухе. «От этого света – пишет В.В.Петров – темный покой довольно ясно освещен быть может». Это первая идея об электрическом дуговом освещении.

Продолжая изучать процессы горения, В.В.Петров начинает исследовать как «горят» в пламени дуги различные тела, примененные в качестве электродов или вносимые в зону дуги. Здесь он от-

крывает способность восстановления окислов олова, свинца, ртути в металл, что послужило началом электрометаллургии.

В.В.Петров имел источник достаточно высокого напряжения и оригинально решил задачу измерения «силы действия» (напряжения) батареи. Он подвешивал между электродами легкий пробковый шарик, который начинал за счет сил отталкивания и притяжения качаться между электродами. По величине наименьшего расстояния, при котором непрерывное качание еще имело место, оценивалась сила действия.

Отметим еще одно обстоятельство в деятельности В.В.Петрова. Первоначально источником электричества были электростатические устройства, т.е. электричество создавалось за счет трения. С появлением гальванических элементов появилось представление и о новом виде электричества. Петров ставит вопрос – являются ли «электрические» и «гальванические» токи одним и тем же явлением – и на опытах приходит к выводу о том, что данные опытов «доселе еще показывают большее или меньшее различие между действиями гальвано-вольтовской и электрической жидкости».

Почему же В.В.Петров сделал этот неверный вывод? Дело в том, что в электростатических машинах обычно получают высокие напряжения, но малое количество электричества, а в гальванических элементах – наоборот, т.е. неверные выводы получены из-за несопоставимых условий опыта.

Первым в России электротехником, положившим начало практическому применению электричества, был П.Л.Шиллинг (1786–1837).

*Павел Львович Шиллинг* родился в Ревеле (Таллин), участвовал в Отечественной войне 1812–1813 гг. Офицер. За храбрость, проявленную при Фер-Шампенуазе, награжден саблей с надписью «За храбрость».

Ему принадлежит изобретение и осуществление электромагнитного телеграфа раньше, чем это сделали Вильгельм Эдуард Вебер и Карл Фридрих Гаусс. В 1803–1812 гг. П.Л.Шиллинг был переводчиком в русском посольстве в Мюнхене и здесь познакомился с работами Земеринга, построившего электрохимический телеграф. На одном конце линии стояли гальванические элементы, а на дру-

гом – сосуды с электролитом. При включении линии в сосудах начиналась реакция с выделением газа. У Земеринга была возможность передачи 27 сигналов (27 линий). Была и отдельная линия с выходом на звонок для привлечения внимания человека, принимающего сигналы.

П.Л.Шиллинг создал электромеханический телеграф, который в 1832 г. работал между Зимним дворцом и Министерством путей сообщения. Передача производилась по 6 проводам при помощи 16 клавиш. На приемном пункте ток, проходящий через катушки, приводил к повороту магнитных стрелок с дисками. В приемном аппарате один из дисков поворачивался белой или черной стороной. Набор кружков соответствовал букве алфавита (работы Морзе начались лет на десять позже). Работа П.Л.Шиллинга в области дипломатии дала ему знакомство с криптографией, что позволило ему создать кодовые таблицы. Провода телеграфа укладывались под землей. Для изоляции применялась шелковая или пеньковая пряжа. Изолированные провода помещались в стеклянные или глиняные трубки с резиновыми муфтами. Все провода П.Л.Шиллинг размещал в единой просмоленной оболочке, т.е. создал первый электрический кабель.

На открытие П.Л.Шиллингом телеграфа А.С.Пушкин написал стихотворение «О, сколько нам открытий чудных готовит просвещенья дух...».

В 1836 г. П.Л.Шиллинг на канале при Адмиралтействе демонстрировал опыт телеграфирования по подводному кабелю. Известны также опыты П.Л.Шиллинга по взрыванию мин с помощью электрического тока. В 1812 г. П.Л.Шиллинг демонстрировал в Петербурге взрывание мин электрическим током и на поверхности и под водой («взрывал на Неве мины сквозь воду»). В 1815 г. эти опыты демонстрировались и Париже, причем провода пересекали Сену. Однако внимание к электродистанционному взрыванию появилось только после русско-турецкой войны 1825-1827 гг., когда появилась необходимость проведения минных работ при осаде крепостей. П.Л.Шиллинг предлагал также применение подводных самодвижущихся мин, но взрывание производилось по проводам. Гальваноударное взрывание было предложено Б.С.Якоби.



Развитие теории и практики электричества связано с академиком Э.Х.Ленцом (1804–1865).

*Эмилий Христианович Ленц* родился в г.Юрьеве, обучался в местном университете. Научную деятельность начал как географ, участвуя в качестве физика в кругосветном плавании (1823–1826 гг.) Отто Евстафьевича Коцебу и других экспедициях.

В 1828 г. Э.Х.Ленц получил звание адъюнкта Академии наук и начал работать в Санкт-Петербурге, где от физической географии перешел к электромагнетизму. В 1834 г. он был избран академиком и, кроме того, возглавил кафедру физики и физической географии в Петербургском университете и занимал эту должность до конца жизни. В течение ряда лет Э.Х.Ленц был деканом физико-математического факультета, а в 1863 г. был избран ректором университета. После смерти В.В.Петрова Э.Х.Ленц возглавил Физический кабинет Академии наук.

В то время в университете практиковалось чтение лекций по определенным, часто иностранным учебникам. Э.Х.Ленц читал лекции по своим работам. В расписании 1836–1837 учебного года значилось:

Щеглов (адъюнкт) – физика невесомых тел с теорией теплорода и электричества (обыкновенного и гальванического) по Пекле с изменениями из других авторов;

Ленц (профессор) – теория электродинамических явлений по собственным запискам.

В 1802 г. Джованни Д. Романьози первым наблюдал действие проводника с током на магнитную стрелку. Позднее, в 1820 г. датский физик Ханс Христиан Эрстед (1777–1851) обнаружил заново и описал это явление в работе «Опыты, касающиеся действия электрического конфликта на магнитную стрелку».

В 1820 г. Андре Мари Ампер (1775–1836) показал, что соленоид с током подобен магниту, и высказал предположение, что магнитных масс не существует, а причиной магнитного влияния являются токи, протекающие по элементарным контурам в теле магнита.

В 1820 г. Доминик Франсуа Араго (1786–1853) обнаружил намагничивание проводника протекающим по нему током. По рекомендации Ампера Араго заменил прямолинейный проводник спира-

лью, что усиливало намагничивающее действие проводника. Количественную зависимость действия тока на магнитное поле установили французские ученые Жан Батист Био (1774–1862) и Феликс Савар (1791–1841).

В 1821 г. Ф.Д.Араго наблюдал успокаивающее действие металлической пластинки на качающуюся магнитную стрелку, которая казалась как бы погруженной в вязкую среду. В 1824 г. Араго открыл явление вращения медного диска вслед за вращающимся магнитом.

В 1832 г. Майкл Фарадей (1791–1867) сделал сообщение об открытии явления электромагнитной индукции; он обнаружил появление тока в контуре, движущемся по отношению к магниту или по отношению к другому контуру с током. Таким образом, электрические явления могут возникать как следствие процессов в области магнитных явлений (т.е. стало известно явление, обратное наблюдениям Араго и Эрстеда).

Между прочим, в понятиях физиков появился новый вид тока, генерированный при помощи явления фарадеевой индукции. К проблеме различия между токами, полученными от гальванических батарей и электростатическими методами, добавился новый ток, наводимый за счет индукции. Этот ток в опытах Фарадея был кратковременным, переменным и не мог влиять на магнитную стрелку или приводить к явлениям электролиза как гальвано-вольтовская жидкость. А ведь в 1834 г. Фарадей открыл законы электролиза, нашел способ измерения количество электричества, а также установил соотношения между электрическими и химическими явлениями.

Э.Х.Ленц обобщил оба понятия и показал обратимость явлений магнитоэлектрических и электромагнитных: «Каждый электромагнитный опыт может быть обращен таким образом, что он приведет к соответственному магнитоэлектрическому опыту. Для этого нужно сообщить проводнику гальванического тока каким либо иным способом то движение, которое он совершает в случае электромагнитного опыта и тогда в нем возникает (подчеркнуто Э.Х.Ленцом) ток направления, противоположного направлению тока в электромагнитном опыте».

В магнитоэлектрическом опыте, приводя в движение проводник, мы совершали работу, т.е. преодолевали сопротивление. Какое? Вызванное током, наведенным в проводнике и его взаимодействием с магнитным полем. По сути, это представление о сохранении и превращении энергии. Э.Х.Ленц показал роль ЭДС в электро-механическом преобразовании энергии.

Э.Х.Ленц провел тщательные исследования, начатые Джоулем, по определению теплового действия тока и по результатам написал в 1844 г. работу «О законах выделения тепла гальваническим током». Существовало мнение, что тепловое действие тока зависит от силы тока, сопротивления и материала проводника. Э.Х.Ленц показал, что «разница в природе металлов, из которых сделаны провода, сказывается только как вызванная этой природой разница в сопротивлениях», т.е. окончательно подтвердил закон Ома, который в то время еще подвергался сомнению. Он окончательно подтвердил то количественное соотношение, которое известно сейчас как закон Джоуля – Ленца.

Сравнивая тепловое действие «различных» токов, характер их распределения между параллельными цепями, в том числе при параллельном соединении твердых и жидких проводников, Э.Х.Ленц убедился, что никакой разницы нет, и во всех случаях распределение токов подчиняется закону Ома. Тем самым Э.Х.Ленцом была подведена база под представление о единой природе электрического тока независимо от вида источника, т.е. о единой природе электричества.

При изучении явления электромагнитной индукции Э.Х.Ленц попутно сделал ряд ценных выводов. Так, он убедительно показал, что различный характер процессов в цепях постоянного и переменного токов зависит не от различной природы этих токов, а от характера изменения тока. Причина этой разницы «не в природе самих токов, но в условиях их следования один за другим, и явления оказались бы такими же, как и в случае, если бы гидро-гальванический ток пропускаться через проводник так же попеременно в противоположных направлениях при помощи коммутатора».

Очень интересной для электротехники является работа Ленца «О влиянии скорости вращения на индуктивный ток, производимый магнитоэлектрической машиной». Изучая генераторы, работающие на постоянное сопротивление, Вебер обнаружил отсутствие пропорциональности между числом оборотов якоря и силой тока. Действительно  $E=Blv$ , а  $I=E/R$ , т.е. ток должен быть пропорционален скорости. Нарушение пропорциональности Вебер объяснил «запаздыванием» намагничивания. Э.Х.Ленц считал, что это связано не с более медленным, чем скорость, нарастанием ЭДС, а вызвано обратным влиянием тока в якоре на магнитное поле, индуцирующее этот ток. В настоящее время это явление называют реакцией якоря, т.е. влиянием тока якоря на общее магнитное поле машины. Одновременно Э.Х.Ленц показал, что для преодоления реакции якоря следует сдвигать щетки по коллектору. (Понятие геометрической и физической нейтрали изучается в курсе электрических машин; там же говорится и о сдвиге щеток). «В магнитоэлектрических машинах – пишет Э.Х.Ленц – для максимального действия коммутатор должен иметь свое положение для каждой скорости» (точнее, для каждого значения тока). Однако это интересное явление сейчас не имеет практического значения, так как имеет смысл при неизменном или мало меняющемся токе. К тому же в современных электрических машинах применяются более эффективные методы компенсации реакции якоря.

Современником Э.Х.Ленца был академик Б.С.Якоби (1801–1874).

*Борис Семенович Якоби* родился в г.Потсдаме и при рождении получил имя Морис-Герман. Обучался в Берлинском и Геттингенском университетах. В Геттингенском университете Б.С.Якоби получил диплом архитектора, что предполагало также знание строительного дела, машиностроения. В программу входил также обширный курс математики, включая раздел комбинаторики. Впоследствии Б.С.Якоби использовал эти знания при составлении телеграфных кодов.

В 1831 г. Б.С.Якоби назначен руководителем строительства дорог в Шенеберге. При работе он убедился в примитивности дорожной техники, пытался применить для нее паровые двигатели, но

не нашел поддержки, в 1832 г. был вынужден покинуть строительство, и получил должность инспектора гавани в Пиллау. Его брат, профессор Кенигсбергского университета Карл Якоби ввел его в университетские круги, где он заинтересовался вопросами магнетизма. К этому времени появилась статья Вильяма Стерджена о создании магнита с подъемной силой 3,6 кг (1825 г.) и работа Джозефа Генри «О приложении принципа гальванического мультипликатора к электромагнитным аппаратам, а также о проявлении значительной электромагнитной силы в мягком железе с помощью небольшого гальванического элемента» (1831 г.). В Йэльском университете Генри создал магнит с силой тяги 100 кг.

Приступив к исследованиям, Б.С.Якоби сразу же столкнулся со сложностями, связанными с низким сроком службы и малой эффективностью гальванических элементов. Совершенствуя их, Б.С.Якоби предложил амальгамировать цинковые пластины и добился увеличения срока их действия до 24 часов. Работы с гальваническими элементами продолжались и впоследствии.

На основе применения электромагнитов Б.С.Якоби создает первый образец двигателя. 5 сентября 1834 г. в издаваемой в Петербурге газете «St-Petersburg Zeitung» (№ 206) на немецком языке появилась статья «Электромагнитный Perpetuum Mobile», где говорилось «Уже 8 апреля текущего года архитектору Б.С.Якоби удалось здесь получить непрерывное вращение посредством возбуждения электромагнетизма в мягком железе. Изготовленный в мастерских механика Штейнфурта аппарат больших размеров был показан 16 мая многим здешним выдающимся ученым и техникам, которые наблюдали его действие. Он состоит из восьми неподвижных и восьми прикрепленных к диску, вращающемуся на горизонтальном валу, железных стержней длиной 7 дюймов и диаметром 14 линий (0,1 дюйма), обмотанных спиральными витками медной проволоки толщиной полторы линии. Концы этой проволоки попеременно соприкасались то с цинковой, то с медной пластинкой обыкновенной гальванической батареи, благодаря чему возникает магнитная сила, которая вращает со скоростью пять с половиной футов в секунду массу. Происходящая при каждом обороте (или через каждые 7/8 секунды) восьмикратная смена полюсов производится при по-

мощи особого устройства оригинальной конструкции. Г-н Якоби в настоящее время занят доказательством несомненной возможности применения этой новой силы к движению машин».

В дальнейшем Б.С.Якоби стал располагать на подвижном диске стержни с обеих сторон, и с обеих сторон расположил и неподвижные диски, т.е. по сути, удвоил двигатель. С целью достижения большей компактности Б.С.Якоби начал располагать стержни не вдоль оси вращения, а радиально, т.е. двигатель принял более привычный для нас вид. Для дальнейшего увеличения мощности Б.С.Якоби стал устанавливать на один вал несколько таких двигателей. Вследствие увеличения общей длины такой двигатель располагался вертикально, а движение передавалось через коническую зубчатую пару.

Для изменения направления тока в обмотках Б.С.Якоби изобрел «особое устройство» – коллектор.

О своих работах Б.С.Якоби пишет «Памятную записку о применении электромагнитной силы для приведения в действие машин» (1835). За эти работы Якоби был удостоен ученой степени доктора философии.

В 1835 г. Б.С.Якоби был приглашен профессором архитектуры в Юрьевский университет, где продолжил работы по постройке электродвигателей.

В России Якоби принял русское подданство, женился на русской А.Г.Кохановской и принял православную веру, получив при крещении имя Борис Семенович (отца Якоби звали Симон).

В 1838 г. Б.С.Якоби избран членом-корреспондентом Российской академии наук; в 1842 г. утвержден экстраординарным академиком по прикладной механике, а в 1847 г. – по технологии и прикладной химии. В 1866 г. после смерти Э.Х.Ленца Б.С.Якоби получил звание ординарного академика по кафедре физики.

В 1838 г. в Петербурге была создана комиссия «Для приложения электромагнитной силы к движению машин по способу профессора Якоби» под председательством адмирала Ивана Федоровича Крузенштерна. В состав комиссии входили академики Николай Иванович Фусс, Адольф Яковлевич Купфер, Эмилий Христианович Ленц,

Михаил Васильевич Остроградский, академик горный инженер П.Г.Соболевский, член-корреспондент Академии наук П.Л.Шиллинг.

13 сентября 1838 г. на Неве была испытана лодка с электродвигателем, двигавшаяся против течения Невы. В лодке было 11 человек. Длина лодки 3,5 м, ширина 2,1 м, двигатель имел мощность до  $\frac{3}{4}$  л.с. (около 550 Вт). Двигатель состоял из 40 единичных двигателей, объединенных по 20 штук на двух вертикальных валах. Другой образец двигателя Якоби был поставлен на тележку, двигавшуюся по рельсам с одним человеком. Источником энергии служили батареи элементов Даниэля; для привода лодки этих элементов было 300, что давало напряжение около 500 В. Б.С.Якоби, таким образом, был первым, кто создал электрифицированный транспорт. До Б.С.Якоби попытки создать электродвигатель шли по пути копирования паровых машин, т.е. с возвратно-поступательным движением. Б.С.Якоби первый сделал двигатель вращательного движения, и для реализации такого движения создал коллектор. Безусловно, и тогда и сейчас транспорт с питанием от гальванических батарей требует высоких энергетических показателей источника питания (КПД, емкость батарей). Якоби сумел усовершенствовать элементы Даниэля, заменив в них медные пластины на платиновые.

При испытании лодки с электродвигателем число элементов удалось уменьшить до 64, но для этого потребовалось около полпуда платины. Получить ее удалось с помощью министра финансов России Егора Францевича Канкрин, который проявлял большой интерес к вопросам развития транспорта.

При изучении электрических машин Б.С.Якоби показал, что на них распространяется общий для всех двигателей закон: что можно выиграть в скорости двигателя, то будет проиграно в силе и наоборот. До этого существовали несбыточные надежды на «вечный электродвигатель», (напомним, что  $EI = FV$ ). Таким образом, Б.С.Якоби может считаться предшественником открытия закона сохранения энергии.

Работая над электромагнитами и электрическими двигателями, Б.С.Якоби вместе с Э.Х.Ленцем впервые поставили задачи развития теории электрических машин, такие, как определение параметров батарей для питания (определение потребных токов и на-

пряжений), площади сечения магнитопроводов, числа витков обмоток. Решение этих задач позволило в дальнейшем создать теорию электрических машин, что было начато в работах братьев Дж. и Э.Гопкинсон, Э.Арнольда и др.

Занимаясь вопросами улучшения качества гальванических элементов, Б.С.Якоби обнаружил, что в элементе Даниэля осевший на электроде слой меди можно легко снять и этот слой в точности повторяет очертания и подробности поверхности электрода. Это дает возможность получить негативную, а при повторном копировании и позитивную копии. Первой такой копией было воспроизведение медной монеты, что, кстати, может рассматриваться как подделка денежного знака. Одновременно Б.С.Якоби предложил таким методом выполнять клише для печатания денег и ценных бумаг. Это исключало неточности, допускаемые при гравировке, и облегчало обнаружение поддельных оттисков. Благодаря этому Б.С.Якоби удалось легко продвинуть свое изобретение в практику. Б.С.Якоби стал изобретателем гальванопластики. Привилегии (патента) на гальванопластику Якоби не получил. Она была куплена русским правительством за 25 тыс. рублей «для всеобщего обнародования на пользу всей империи, а если угодно, то и для пользы всего света».

В 1840 г. Б.С.Якоби выпустил руководство под заголовком «Гальванопластика или способ по данным образцам производить медные изделия из медных растворов с помощью гальванизма». В 1846 г. Б.С.Якоби сделал в Академии наук сообщение о возможности применения для осаждения «гальванической» меди магнито-электрической машины, т.е. генератора постоянного тока, но это предложение было осуществлено лишь спустя много лет.

В 1842 г. Б.С.Якоби на докладе в Академии наук показал выполненную методом гальванопластики статуэтку Наполеона, а также украшенный орнаментом стол, верхняя доска которого имела диаметр 76 см.

В 1840 г. за изобретение гальванопластики Б.С.Якоби получил золотую медаль от Парижской академии, а в 1867 г. был удостоен золотой медали на Парижской выставке.

В 1844 г. было создано «Санкт-Петербургское гальванопластическое и художественной бронзы заведение» (находилось около Нарвских ворот), где по способу Якоби было сделано много скульп-



тур и барельефов, украшающих до сих пор Зимний дворец, Исаакиевский собор, Главный штаб. Предложенными Б.С.Якоби способами гальванического золочения и серебрения были покрыты золотом медные листы для куполов Храма Христа Спасителя.

Б.С.Якоби продолжил начатые П.Л.Шиллингом работы по созданию электромагнитного телеграфа. Он создал ряд аппаратов, включая буквопечатающий. Была создана телеграфная линия Петербург – Царское село. При создании первого пишущего аппарата, дающего при записи зигзагообразную линию (перо было соединено с электромагнитом), буквы кодировались числом зигзагов, что потом повторено в коде Морзе. При проведении телеграфных линий Б.С.Якоби использовал землю как второй провод, а также ввел в практику провода со свинцовой оболочкой и изоляцию из каучука. Однако Б.С.Якоби понимал сложности поддержания исправного состояния изоляции подземных кабелей и настойчиво предлагал по возможности использовать воздушные линии, что в то время многими воспринималось как несерьезное предложение.

Б.С.Якоби также продолжил работы П.Л.Шиллинга по электровзрыванию мин. Он предложил создавать минные поля для оборонительных целей. Учитывая сложности дистанционного взрывания мин по проводам, Б.С.Якоби разработал контактные взрыватели, действующие при механическом соприкосновении с миной: ртутный контакт и шариковый взрыватель. Во время войны 1855 г. по проекту Б.С.Якоби были установлены минные заграждения на подходах к Кронштадскому рейду, на которых подорвались английский флагманский корабль «Мерлин» и четыре парохода.

Б.С.Якоби уделял много внимания вопросам измерения. Он создал эталон сопротивления и разослал его по лабораториям, чтобы сопоставлять результаты исследований. Он был также представителем России в Международной комиссии по установлению мер и весов и был избран председателем этой комиссии. В 1849 г. Б.С.Якоби внес в Академию наук предложение об изготовлении новых прототипов мер и весов метрической системы. Это предложение было принято на конференции 17 государств, но осуществлено лишь в 1875 г., уже после смерти Б.С.Якоби.

По инициативе Б.С.Якоби в России была начата подготовка специалистов в области электротехники. В 1840 г. при лейб-гвардии саперном батальоне была сформирована особая учебная команда «для теоретического обучения гальванизму и способам применения его в военном употреблении». В команду направлялись по одному поручику, одному унтер-офицеру и по два рядовых от каждого саперного батальона. Первым преподавателем в команде был сам Б.С.Якоби.

## **РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XIX ВЕКА**

Во второй половине XIX века уже формулируются основные теоретические положения и понятия электротехники, возникает электротехника как научно-техническая отрасль. В 1827 г. выходит в свет фундаментальный труд Георга Симона Ома (1787–1854) «Гальваническая цепь, разработанная математически доктором Омом», в которой формулируется известный закон. В 1845 г. Густав Роберт Кирхгоф (1824–1887) написал работу «О протекании электрического тока через плоскую пластину, например, круглой формы». В примечании к этой работе были сформулированы два закона Кирхгофа, являющиеся фундаментальными законами теоретической электротехники. В 1873 г. Джеймс Кларк Максвелл (1831–1879) в трактате «Об электричестве и магнетизме» формулирует ряд фундаментальных соотношений. Интенсивное развитие промышленности требует применения современных достижений науки. И тут роль русских ученых-электротехников, изобретателей и практиков очень существенна, хотя целый ряд их работ нашел применения не в России, а вначале на Западе.

Заметные работы начинают вестись в области электрического освещения. В первую очередь начинаются работы по использованию дуги В.В.Петрова. Препятствием к этому использованию было применение в качестве источника энергии гальванических элементов. Но в 1860 г. Антонио Пачинотти (1841–1912), а в 1870 г. Зеноб (Зиновий) Теофил Грамм (1826–1901) создают генераторы с кольце-

вым якорем и спиральной обмоткой, что дает достаточно мощный и надежный источник для питания освещения (до 80-х годов это машины часто назывались «световыми машинами»).

Однако при практическом применении дугового освещения возникает ряд технических проблем. Прежде всего, это изменение расстояния между электродами по мере сгорания углей. Предлагаемые регуляторы для стабилизации тока или часовые механизмы, равномерно сближавшие угли, отличались сложностью или не решали полностью поставленной задачи, хотя среди них были и очень интересные решения. К этому раннему периоду истории электрического освещения принадлежат работы А.И.Шпаковского (1823–1881) – преподавателя Павловского кадетского корпуса. В 1836 г. А.И.Шпаковский сконструировал дуговые лампы с автоматическими регуляторами для иллюминации Красной и Лефортовской площадей в Москве во время коронации Александра II.

Второй задачей, возникающей при использовании электрической дуги, стала проблема подключения нескольких приемников к одному источнику питания. Дело в том, что параллельное включение дуговых приборов практически исключается, гореть будет лишь та горелка, у которой падение напряжения в дуге меньше. Последовательное соединение также имеет ряд недостатков, так как очень сложно согласовать работу регуляторов дуги в отдельных горелках. Эти регуляторы все должны регулировать один и тот же ток; в результате в одних горелках угли полностью смыкались, а в других происходил разрыв дуги. Возникла проблема «дробления» света, которую иногда решали путем применения систем зеркал. Использовать малые генераторы для каждой горелки также непрактично, поэтому часто один источник питал одну мощную дуговую лампу.

В 70-х гг. XIX века этими проблемами занимались П.Н.Яблочков, А.Н.Лодыгин и В.Н.Чиколев, работы которых сделали электрическое освещение практически приемлемым, а П.Н.Яблочков довел свою систему освещения до применения в европейском масштабе.

*Александр Николаевич Лодыгин* (1847–1923) родился в Тамбовской губернии. Окончил Воронежский кадетский корпус и поступил в Московское юнкерское училище. После присвоения перво-

го офицерского чина вышел в отставку и поступил в Санкт-Петербургский университет, но не закончил его, а начал заниматься электрическим освещением.

Проектируя свет лампы на экран, А.Н.Лодыгин убедился, что свет лампы в основном происходит от раскаленных концов углей, а свет самой дуги мал. «Поэтому – пишет Лодыгин – мне пришла в голову мысль заменить вольтову дугу угольным стержнем, который, будучи накален, давал бы свет..., не потребляя лишней энергии. Таким образом, от двух угольных полюсов, соединенных дугой, я пришел к одному тонкому углю, не представляющему перерывов».

Для реализации своей идеи А.Н.Лодыгин создал товарищество «Лодыгин и К<sup>0</sup>». Но у товарищества не было денег на проведение работы, хотя в 1874 г. Петербургская академия наук присудила А.Н.Лодыгину Ломоносовскую премию (1000 руб.).

Товарищество возглавил предприниматель Кон, вследствие чего многие образцы ламп называли «Лампы Кона».

В 1873 г. А.Н.Лодыгин осветил улицу в Петербурге в Песках (район нынешних Советских улиц). Применялись лампы и для подводного освещения при строительстве Литейного моста. В 1873–1874 гг. А.Н.Лодыгин демонстрировал освещение в Технологическом институте, а затем устроил временное электрическое освещение в Галерной гавани (Васильевский остров) в Петербурге.

А.Н.Лодыгин работал над лампами с угольным стержнем, запаянным в стеклянной колбе. Он считал, что когда выгорит весь кислород, дальнейшее разрушение стержня прекратится. Позднее А.Н.Лодыгин работал и с вакуумными лампами. Для изготовления стержней А.Н.Лодыгин использовал не ретортный уголь, а уголь, полученный из обугленного в угольном порошке дерева или других растительных волокон. Это впоследствии применяли многие изобретатели ламп накаливания, в том числе и Томас Алва Эдисон.

Эдисону были известны работы А.Н.Лодыгина. Это следует из того, что когда возникло судебное дело в американском суде между Эдисоном и Сваном, суд аннулировал привилегии обоих, мотивируя это существованием патентов А.Н.Лодыгина. Эдисон не изобрел лампу накаливания, но он разработал во всех деталях систему

электрического освещения, включая патрон, цоколь лампы и выключатель, а также систему централизованного электроснабжения.

В 1876 г. Кон умер, и товарищество распалось. А.Н.Лодыгин был вынужден поступить слесарем-инструментальщиком, а затем инженером-металлургом в Петербургский арсенал. В 1878–1884 гг. он работал в товариществе «Яблочков и К<sup>о</sup>», а в 1884 г. уехал в Париж, где работал на заводе над усовершенствованием своих ламп. Лампы стали изготавливаться в промышленных масштабах. Сила света их составляла от 10 до 100 свечей с энергоемкостью 0,8-1,8 Вт на свечу. Срок службы доходил до нескольких сот часов, хотя из-за недостатков технологии качество было очень неоднородным. В 1906 г. американская фирма приобрела патент А.Н.Лодыгина на лампу накаливания с металлической нитью. Ряд патентов приобрели и фирмы других стран.

В 1906 г. А.Н.Лодыгин вернулся в Россию, где хотел продолжать работу, но признания не нашел. Через 32 года после освещения первой улицы А.Н.Лодыгину предложили должность заведующего подстанциями Петербургского трамвая с чисто административными функциями. А.Н.Лодыгин снова уехал в Америку. 2 ноября 1923 г. А.Н.Лодыгин умер.

*Павел Николаевич Яблочков* (1847–1894) родился в Саратовской губернии в семье обедневшего помещика. Обучение начал в гимназии в Саратове, но окончил только четыре класса. Имея склонность к занятиям техникой, он поступает в Николаевское военное училище в Петербурге. Училище было специальным и давало знания в области военной техники. Для поступления в училище П.Н.Яблочкову, как не окончившему гимназии, пришлось проходить репетиционную подготовку в пансионе, принадлежавшем известному офицеру, инженеру и композитору Цезарю Кюи. Училище П.Н.Яблочков окончил, получив чин подпоручика, и был назначен в саперный батальон. Прослужив год, он был направлен в техническое гальваническое заведение, организованное при активном участии Б.С.Якоби. Здесь П.Н.Яблочков увлекся физическими исследованиями, связанными с запросами техники. В 1870 г. он уволился с военной службы и поступил на должность начальника телеграфного отдела Московско-Курской железной дороги, где имел возможность

проводить опыты в мастерских железнодорожного телеграфа. В 1873 г. П.Н.Яблочков познакомился с В.Н.Чиколевым, русским электротехником, одним из популяризаторов электротехнической науки, на технической беседе, которую проводил В.Н.Чиколев в Московском Политехническом музее.

П.Н.Яблочков познакомился с работами В.Н.Чиколева по созданию регуляторов для стабилизации горения дуги и стал помогать В.Н.Чиколеву, тем более что это имело значение для осветительных приборов паровозов. В 1874 г. Яблочков открывает в Москве свою мастерскую, но спроса на осветительные приборы не находит и уезжает в Париж, где поступает помощником в мастерскую фирмы Бреге. Отъезд П.Н.Яблочкова за границу был связан с его значительными долгами. Впоследствии П.Н.Яблочков полностью расплатился со своими кредиторами и выкупил все долговые расписки и векселя. Деньги в Россию по поручению П.Н.Яблочкова привез известный революционер Герман Лопатин.

Луи Франсуа Бреге, человек просвещенный и грамотный, за изобретения в области электротехники был избран экстраординарным членом Парижской академии наук. Часы фирмы Бреге упомянуты А.С.Пушкиным в «Евгении Онегине» («..пока недремлющий брегет не прозвонит ему обед», «..желудок верный наш брегет»). Бреге предоставил своему помощнику П.Н.Яблочкову самые благоприятные условия работы.

В марте 1876 г. П.Н.Яблочков получает французский патент, в тексте которого есть такие слова: «Мое изобретение состоит в совершенном удалении всякого механизма, обыкновенно встречающегося в электрических лампах. Вместо того чтобы автоматически, посредством механизма, сближать угли по мере их сгорания, я помещаю угли рядом друг с другом, разделяя их изолирующим веществом, могущим сгорать вместе с углем, например каолин. Оба угля после такой обработки могут помещаться на особом подсвечнике, и стоит лишь пропустить по ним ток от какого-нибудь источника электричества, как между концами углей появляется дуга; для зажигания я соединяю концы углей небольшим кусочком угля, который сначала накаливается и служит как бы запалом для вольтовой дуги».

Работы П.Н.Яблочкова дали начало новому направлению – сильноточной электротехнике, т.е. применению электроэнергии для хозяйственных и промышленных целей.

П.Н.Яблочков выполнил очень много работ в области совершенствования своих приборов, получивших название «Свеча Яблочкова» и «Русский свет». Очень интересны его работы по введению в изолирующий слой дополнительных веществ. Например, в «химической» свече стержни делались из железа и окружались смесью магнетита и окиси магния. Железо, раскаленное дугой, восстанавливало магний из окиси. Восстановленный магний сгорал в воздухе ярким светом. Электроды этой свечи сгорали не более чем на 1 см в час. В связующую массу изолятора П.Н.Яблочков вводил порошки металла, например, цинка. При сгорании углей и испарении изолирующего слоя металл выделялся и оседал в виде полоски, что приводило к повторному зажиганию света. Были разработаны свечи с добавлением материалов, дающих цветное освещение.

Ранее уже говорилось, что дуги параллельно не горят. П.Н.Яблочков ставил на каждый подсвечник несколько свечей, но горела только одна. При аварии или сгорании первой свечи зажигалась вторая и т.д. Все это дало возможность широкого применения дугового освещения, тем более что оно оказалось дешевле и экологичнее газового освещения. Пробное освещение было устроено в больших Парижских магазинах «Лувр», затем на проспекте Оперы (Avenue l'Opera) и площади Оперы (Place l'Opera). Появляется электрическое освещение в Лондоне, Берлине, Мадриде, дворцах шаха Персидского и короля Камбоджи. П.Н.Яблочков становится европейской знаменитостью. Наконец, свеча Яблочкова появляется в России.

Для того чтобы наладить производство горелок в России, П.Н.Яблочкову надо было откупить привилегию у французского товарищества, которое потребовало миллион франков. П.Н.Яблочков пошел на это, отдав свои акции во французском товариществе, что тяжело отразилось на его благосостоянии. Но деятельность компании в России оказалась неуспешной. П.Н.Яблочков пережил большие лишения и умер у себя на родине, в Саратове, в возрасте 47 лет, оставив семью без средств.

Одновременно дуговое освещение испытывает сильную конкуренцию и начинает уступать лампам накаливания. Лампы Эдисона уступали в светоотдаче, но имели больший срок службы (до сотен часов), допускали более легкое «дробление света», чем свечи Яблочкова. И хотя на первом этапе существенным фактором была реклама, но постепенно дуговое освещение начинает вытесняться лампами накаливания.

Это факты известные. Менее известны другие работы П.Н.Яблочкова, сделанные им для усовершенствования дугового освещения, но нашедшие широкое применение в современной электротехнике. В ярком свете «Свечи Яблочкова» они не так заметны, но представляют значительный интерес. При параллельном расположении электродов в дуговой горелке стало заметно, что положительный электрод сгорает примерно в два раза быстрее, чем отрицательный. При расположении по одной прямой это не имело значения, все равно приходилось сдвигать электроды. Яблочков начал делать положительный электрод в два раза толще. Были и другие предложения компенсации этого недостатка. Например, В.А.Тихомиров предложил один электрод размещать вертикально, а другой располагать по спирали вокруг первого, причем длина спирали вдвое больше длины прямого электрода. Однако проще оказалось применять переменный ток. Специально для этого фирмой Грамма были построены генераторы переменного тока, кстати, более простые по сравнению с генераторами постоянного тока. Оказалось, что переменный ток имеет и ряд других преимуществ, очевидных сегодня.

Обратимся к самому П.Н.Яблочкову. Он писал: «Обыкновенно говорят: машины с постоянным током, я говорю: машины с так называемым постоянным, так как на самом деле в бобинах этих машин ток проходит то по одному, то по другому направлению и направляются в одну сторону с помощью особых приборов, называемых коллекторами. В машинах же с альтернативным током он получается таким, каким его дает природа, он не обязан проходить через трущиеся части и коллекторы, что дает возможность делать машины весьма больших величин и не требующих ремонта при долгом их употреблении... Я не буду входить в подробности описания



этих машин, скажу лишь, что раз мнение сложилось в пользу машин с альтернативным током, типов их явилось громадное множество; все они весьма удовлетворительны и конкурируют между собою только в цене и прочности устройства. Я могу сказать, что поворот вызван, главным образом, моими работами».

Работы П.Н.Яблочкова в области переменного тока – одна из его основных заслуг в области технического прогресса. П.Н.Яблочков совместно с Зенобом Теофилом Граммом создал свой генератор переменного тока. По своей конструкции – это прототип современных синхронных генераторов, в которых токогенерирующая часть расположена неподвижно, а вращается намагниченный индуктор. Имея в виду «дробление» света, П.Н.Яблочков разделил генерирующие обмотки на части, которые можно было включать последовательно или питать от каждой обмотки отдельный приемник или группу приемников. При выходе из строя одной части можно было просто ее отключить, чего нельзя сделать в других генераторах того времени (Зеноба Теофила Грамма, Вернера Сименса). По сути, П.Н.Яблочков создал многофазный генератор, хотя вопрос о фазности он не ставил, имея в виду лишь питание осветительных приборов.

Поскольку при параллельном расположении электродов не требуется регулирования расстояния между ними, достаточно просто включать последовательно до 4-5 ламп. Кроме того, П.Н.Яблочков для «дробления» света использовал ряд возможностей, присущих цепям переменного тока. В ноябре 1876 г. П.Н.Яблочков получил привилегию «Система распределения токов при электрическом освещении». Он пишет: «Я испрашиваю себе исключительное право эксплуатации новой системы распределения токов..., которое существенно характеризуется употреблением индуктивных катушек, включенных в одну цепь, для получения серии индуктированных токов, которые составляют отдельные источники и позволяют питать раздельные лампы разной силы». Тем самым П.Н.Яблочков предложил применение трансформаторов. Специальные трансформаторы для этой цели были изготовлены Иваном Филипповичем Усагиным, лаборантом физического кабинета Московского университета. Первые трансформаторы были с разомкнутым

сердечником, но затем И.Ф.Усагин сделал их и с замкнутой магнитной системой. Надо сказать, что индукционные катушки для повышения напряжения в 1844–1847 гг. применялись Б.С.Якоби для взрывания мин по подводному кабелю длиной до 9 км.

Для регулирования тока П.Н.Яблочков использовал конденсаторы переменной емкости. В это время в электротехнике еще не было введено понятие емкостного сопротивления. Яблочков подробно исследовал процессы заряда и пояснил роль конденсаторов в его схемах, показав себя не только изобретателем, но и ученым. Наконец, П.Н.Яблочков, работая с трансформаторами, сделал предположение о возможности передачи энергии при высоком напряжении.

П.Н.Яблочков сделал и ряд ламп накаливания с телом накала в виде каолиновых пластинок или стержней, которые не требовали вакуума. Однако в перспективность ламп накаливания он не верил.

В.Н.Чиколев (1845–1898), как и Яблочков, был убежденным сторонником дугового освещения и очень много занимался созданием регуляторов для стабилизации горения дуги. Он своеобразно пытался решить проблему дробления света дуги – путем создания системы линз и зеркал. На Охтинском пороховом заводе он применил такую систему освещения, раздробив свет лампы в 3000 свечей на 60 источников света.

*Владимир Николаевич Чиколев* родился в Смоленской области. Оставшись сиротой, он был отдан на обучение в сиротский кадетский корпус. По окончании он уволился с военной службы и поступил вольнослушателем на физико-математический факультет Московского университета. Жил на случайные заработки. По окончании поступил ассистентом в физический кабинет Петровской (ныне Московской Тимирязевской) сельскохозяйственной академии. В 1876 г. В.Н.Чиколев поступил на должность делопроизводителя электротехнического отдела Артиллерийского комитета в Петербурге и работал там до конца жизни.

Можно по-разному оценивать отношение В.Н.Чиколева к лампам накаливания и приверженность к дуговому освещению, но, работая над совершенствованием дугового освещения и применения оптических устройств, В.Н.Чиколев сделал много изобретений. Так, он разработал специальные лампы освещения на расстоянии для по-

роховых заводов. Усовершенствованные им прожекторы с составными кольцеобразными стеклами применялись при обороне Порт-Артура в войне с Японией. В.Н.Чиколев – основоположник отечественной светотехники. Он разработал и осуществил остроумный метод испытания зеркал прожекторов, применил методы фотографии для определения скорости полета снарядов. В.Н.Чиколев также изобрел электрический фонарь для пороховых заводов и погребов, т.е. положил начало изготовлению взрывобезопасного оборудования. Вместе с Р.Э.Классоном В.Н.Чиколев строит электростанцию на Неве для питания осветительных приборов на Охтинском пороховом заводе.

В историю электротехники В.Н.Чиколев вошел как активный популяризатор. В 1872 г. он был одним из организаторов электротехнического отдела Политехнического музея в Москве, в то время одного из важнейших распространителей технических знаний. В 1880 г. вместе с группой электротехников В.Н.Чиколев организовал журнал «Электричество». Им написаны книги «Чудеса техники и электричества» и «Не было, но и не выдумка» (об электричестве). В.Н.Чиколев был человеком высокой честности и порядочности, что показал, работая приемщиком электротехнического оборудования для русской артиллерии. В редакции журнала «Электричество» он, его жена и дочь работали безвозмездно.

Вокруг журнала «Электричество» благодаря организаторской работе В.Н.Чиколева создалась большая группа электриков, не только продвинувших вперед науку, но и широко применявших электротехнику в промышленности.

*Дмитрий Александрович Лачинов* (1842–1902) начал обучение в Московском университете на физико-математическом факультете. Когда в 1861 г. университет был временно закрыт из-за студенческих волнений, Д.А.Лачинов окончил курс за границей (учился у Густава Роберта Кирхгофа, Германа Людвиг Гельмгольца). После возвращения Д.А.Лачинов сдал экзамены за полный курс университета и получил место профессора физики в Петербургском лесном институте.

К работам Д.А.Лачинова относится метод изготовления аккумуляторов из губчатого свинца, способы регулирования электри-

ческих машин. Очень интересны исследования Д.А.Лачиновым процессов, происходящих в дуге (сила света, сила тока, обратная ЭДС в дуге, сопротивление дуги). Большой интерес для нас представляет статья «Электромеханическая работа», помещенная в 1880 г. в журнале «Электричество». Д.А.Лачинов впервые поставил вопрос о передаче механической энергии с помощью электрического тока и исследовал вопрос о КПД передачи. В одной из своих работ Д.А.Лачинов писал: «Универсальность электричества навела многих ученых на мысль об устройстве центрального завода, из которого электричество разносило бы во все концы города ... свет, работу, химическую энергию», т.е. высказал мысль о создании энергетических систем.

Целая группа исследователей открыла новое направление в электротехнике, называемое в настоящее время электротехнологией, т.е. непосредственное использование электрической энергии в технологическом процессе.

В.А.Тихомиров (1849–1899) разработал способы никелирования, распыления металлов с помощью электрического тока. Работал над применением электрических двигателей для орошения.

Н.Н.Бенардос (1842–1905) применил вольтовую дугу для сварки металлических листов, резки металлов, получения отверстий. Дуга образовывалась между изделием и угольным электродом (электрогефест), хотя Н.Н.Бенардос указывал на возможность применения для электродов и других материалов. Для сварки Н.Н.Бенардос использовал аккумуляторы, включая их параллельно и последовательно, а также пробовал и сварку переменным током. Н.Н.Бенардосом предложен ряд модификаций способов сварки: сварка в среде защитных газов, контактная точечная сварка.

Н.Н.Бенардос разработал способ гальванического покрытия больших поверхностей (корпусов судов) слоем меди. Он предлагал также построить в районе Ивановских порогов на Неве электростанцию с подливным колесом, которое можно поднимать при ледоходе, и передавать электроэнергию в Петербург.

*Николай Гаврилович Славянов* (1854–1897) родился в Воронежской губернии, окончил в 1877 г. Петербургский горный институт со званием горный инженер I разряда. В горном институте в то

время физику читал профессор К.Д.Краевич, высшую математику – проф. Г.А.Тиме, прикладную механику – проф. И.А.Тиме, геологию – А.П.Карпинский, металлургию – И.А.Иосса и Н.А.Кулибин (внук И.П.Кулибина). Ввиду отсутствия средств на продолжение обучения, Н.Г.Славянов подал прошение о стипендии и получал ее, а также давал уроки. По окончании института Н.Г.Славянов работал на Воткинском заводе, сначала смотрителем механического и токарного цехов, а затем механиком завода. В 1883 г. Н.Г.Славянов был назначен на Пермские пушечные заводы на должность управителя оружейных и механических цехов, а в 1891 г. стал главным начальником заводов.

По своей должности Н.Г.Славянов занимался совершенствованием уровня производства и обратился к вопросам применения электричества в производственном процессе. В Горном институте в то время электротехника преподавалась лишь как раздел физики, что побудило Н.Г.Славянова заняться ее глубоким изучением. За короткий срок Н.Г.Славянов изучил ее настолько, что сам создавал конструкции электрических машин и аппаратов.

Начал он с электрического дугового освещения рабочих цехов и для этих целей создал ряд конструкций динамо-машин и регуляторов дуги. Им были построены генераторы на 800 А; 60 В и 1000 А; 100 В.

Первая привилегия (патент) была получена Н.Г.Славяновым под названием «Электрическая отливка металлов». Вместо угольного электрода Н.Г.Славянов предложил применять металлический, который плавился под действием дуги и стекал на обрабатываемый предмет, являвшийся вторым электродом. Отказавшись от угольного электрода, Н.Г.Славянов избежал дополнительного углерода в сварном шве. Способ Н.Г.Славянова – это способ электропаяния и электроотливки, который применялся при ремонте изношенных деталей машин (заполнение трещин и пустот, наварка изношенных зубьев шестерен, покрытие детали новым слоем металла). Наплавка производилась в форму (ваннный метод), заливаемую материалом расплавленного электрода. Н.Г.Славянов первым обратил внимание на то, что можно применять электроды специального состава, т.е. в нашем понимании с легирующими добавками.

Целый ряд ученых того времени утверждал, что этот метод непригоден для сварки цветных металлов и совершенно невозможен для черных металлов. Для демонстрации возможностей метода Н.Г.Славянов сделал многослойную отливку из колокольной бронзы, томпака (сплав меди с цинком), никеля, стали, чугуна, нейзильбера и бронзы. Слиток был обработан в виде 12-гранной призмы, просверленной внутри. Высота «стакана» 210 мм, а масса составляла 5330 г. Предложенный метод получил широкое применение на многих заводах в России и за границей. В 1890–1891 гг. мастерские Урало-горнозаводской железной дороги затратили на восстановление методом электроотливки деталей 4292 руб., в то время как стоимость этих новых деталей составила бы 26766 руб. На IV электротехнической выставке в 1892 г. была представлена сваренная методом Славянова труба из красной меди, которая при испытании выдержала давление 500 атм. На Пермских пушечных заводах методом электросварки (вместо клепки) был построен корпус парохода «Редя князь Касогский», переименованный затем в «Степана Разина». Сварка использовалась и в основном производстве при изготовлении пушечных лафетов.

В 1892 г. выходит книга Н.Г.Славянова «Электрическая отливка металлов», получившая широкую известность в России и за границей. Отличие методов Н.Г.Славянова и Н.Н.Бенардоса в том, что Н.Н.Бенардос рассматривал электрод как средство в первую очередь для создания дуги, а Н.Г.Славянов рассматривал его как носитель металла для создания шва или части детали.

При создании на пушечных заводах оружейных стволов высокие требования предъявляются к качеству отливок, которое можно повысить, применяя термические средства при охлаждении слитков. Н.Г.Славянов применял дугу для уплотнения металлических отливок. Он применял подогрев отливки для более равномерного остывания всего объема. Это позволяло избежать образования пустот, раковин. Таким методом получались отливки до 700 пудов при токе в дуге 800 А, напряжении до 70 В и времени обработки 3–8 часов.

Н.Г.Славянов намеревался также своим методом починить Царь-Колокол, но, к сожалению, умер в возрасте 43 лет.

Работы Н.Н.Бенардоса и Н.Г.Славянова неоднократно представлялись и награждались на выставках. В 1887 г. Н.Г.Славянов был удостоен серебряной медали на Урало-Сибирской промышленной выставке, работы Н.Г.Славянова экспонировались на Всемирной электротехнической выставке в 1893 г. в Чикаго.

На метод электрической отливки металлов Н.Г.Славянов получил патент США.

В 1892 г. на IV Всероссийской электротехнической выставке было присуждено только две высшие награды – медали Русского технического общества:

«Дворянину Н.Н.Бенардосу – за успешное применение вольтовой дуги к спаиванию металлов и наплавлению одного металла на другой».

«Горному инженеру Н.Г.Славянову – за успешное применение вольтовой дуги к производству металлических отливок и к последующей их обработке с целью изменения химического состава металла и улучшения его механических свойств».

### **РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Начало развития теории и практики электромеханических преобразований относится к 1820-м годам.

В 1820 г. Ганс Христиан Эрстед опубликовал работу «Опыты, касающиеся действия электрического конфликта на магнитную стрелку», в которой описал действие тока на электромагнит, а Доменик Франсуа Араго установил, что проводник, по которому протекает ток, приобретает магнитные свойства. В том же году Жан Батист Био и Феликс Савар установили взаимодействие тока и магнитного поля. В 1821 г. Майкл Фарадей открыл явление вращения проводника с током вокруг полюса постоянного магнита. В 1824 г. Араго открыл явление электромагнитного вращения: медный, а не магнитный диск вращался вслед за вращением магнита. В 1825 г. Виль-

ям Стерджен изобрел магнит с железным сердечником, что дало возможность получения более сильных магнитных полей. Опубликованный в 1831 г. Фарадеем принцип электромагнитной индукции позволил объяснить поведение диска Араго.

В 1833 г. академик Э.Х.Ленц сформулировал закон, который доказывал идентичность явлений, происходящих в двигателе и в генераторе, а в 1838 г. показал это экспериментально. Такие же выводы в 1847 г. сделал Б.С.Якоби, но до 60-х гг. XIX века конструирование и создание генераторов и двигателей шло как бы параллельно, причем преобладало создание генераторов для целей освещения. В 1834 г. Б.С.Якоби построил электрический двигатель вращательного движения, а в 1842 г. – первый в России электрический генератор с постоянными магнитами. В этот период были сделаны четыре фундаментальные изобретения:

1. Применение электромагнитов вместо постоянных магнитов. В 1833 г. на такую возможность указал Уильям Риччи, а затем Вильгельм Иозеф Зинстеден в 1851 г., венгерский физик Аньош Иедлик в 1856 г. и англичанин Уайльд в 1863 г. После этого началось практическое применение обмоток возбуждения.

2. Открытие в 1851 г. датчанином Сёренсом Хиортом принципа самовозбуждения генераторов постоянного тока. Это открытие не было оценено и получило применение с 1866 г. благодаря Уайльду, и английским телеграфным инженерам Карнелию и Самюэлю Верлей, которые в 1866 г. запатентовали самовозбуждающийся генератор. Все перечисленные изобретатели предлагали генераторы с последовательным возбуждением, что вообще не очень удобно. В 1867 г. англичанин Чарльз Уитстон и немецкий ученый Вернер Сименс (1816–1892) предложили генератор с параллельным самовозбуждением. В докладе Сименса Берлинской академии наук были такие слова: «Однако того малого 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 обмотки неподвижного магнита, чтобы сделать прибор способным давать ток при каждом возобновлении вращения». Шунтовой генератор вначале не имел успеха, но благодаря энергии Си-



менса он стал поворотным пунктом истории электромашиностроения и к началу 80-х гг. вытеснил генераторы с последовательным возбуждением; в это же время благодаря трудам Карнелия Верлея, Чарльза Френсиса Бреша, Марселя Депре стали применяться и компаундные генераторы.

3. Изобретение кольцевого якоря с замкнутой спиральной обмоткой – Антонио Пачинотти в 1860 г. и Зеноб (Зиновий) Теофил Грамм в 1870 г. Грамм существенно усовершенствовал коллектор, расположив его горизонтально (до этого коллекторы были торцевые). Грамм же указал на возможность применения на кольцевом якоре со спиральной обмоткой многополюсной магнитной системы.

4. Мероприятия для борьбы с вихревыми токами в железе якоря. Впервые в 1849 г. Зинстеден сделал кольцевой якорь из проволоки, однако это изобретение не оценили и продолжали строить машины с массивным якорем. Отход от этой практики начался с 1871 г., когда Грамм взял патент на кольцевой якорь из проволоки. Обоснование необходимости шихтовки якоря было сделано в 1878 г. Чарльзом Френсисом Брешом. В 1880 г. Томас Алва Эдисон (1847–1931) предложил выполнять якоря из листов железа. В 1883 г. Крег предложил применять и шихтованные полюса.

В области практического применения первоначально в период 1822–1834 гг. строились лишь макеты, показывающие возможность электромеханических преобразований. В 1834 г. Б.С.Якоби впервые создал электрический двигатель для применения в практических целях. Этот двигатель был использован для движения бота по Неве против течения. Применение гальванических батарей делало нерациональным использование электрических двигателей для практических целей. О нем стало возможным говорить лишь после изобретений Грамма.

К 1870 г., когда был осознан принцип обратимости электрических машин, происходит слияние путей развития и конструирования генераторов и двигателей и их совершенствование:

в 1873 г. главный инженер фирмы Сименс Фридрих Гефнер-Альтенек (1845–1904) предложил и внедрил в практику однослойные барабанные обмотки;

в 1880 г. американец, конструктор пулемета Хайрем Максим (1840–1916) предложил зубчатый якорь с вентиляционными каналами;

в 1882 г. Вестон конструирует и внедряет двухслойную обмотку для двухполюсной машины;

в 1883 г. изобретена простая барабанная обмотка многополюсных машин (Мерон и Конод);

в 1883 г. изобретены уравнивающие соединения обмотки (Мордей);

в 1884 г. Менгес изобретает дополнительные полюса и компенсационную обмотку;

в 1886 г. братья Джон и Эдвард Гопкинсон обосновали метод расчета магнитных цепей электрической машины, распространив закон Ома на магнитные цепи. Это год зарождения научной теории электрических машин постоянного тока;

в 1891 г. Энгельберт Арнольд, преподававший в Рижском политехническом институте, создал теорию обмоток электрических машин, положив конец кустарщине в этом вопросе. Арнольд также вывел формулу, связывающую геометрические размеры электрической машины с ее мощностью и скоростью. Так, машина постоянного тока мощностью 5000 кВт при номинальной скорости 500 об/мин имеет массу 35 т, а машина 4600 кВт при номинальной скорости 70 об/мин – 122 т;

в 1899 г. Энгельберт Арнольд и Густав Мие разработали теорию коммутации для машин постоянного тока.

После этих изобретений процесс шел по пути углубления теории и методов расчета электрических машин постоянного тока, развития методов их исследования, улучшения качества применяемых материалов, повышения единичной мощности до 5-6 тыс. кВт, снижения удельной материалоемкости. Надо сказать, что на ход этого развития существенное влияние оказывали многие экономические и даже политические факторы. Так, в Германии, ведущей в те годы стране в области электромашиностроения, таможенные пошлины определялись по весу электрической машины. В целях снижения веса часто шли на ухудшение КПД, а иногда и надежности машины. В настоящее время при проектировании электрических машин учитывается общий эффект,

чтобы сократить суммарные расходы не только на производство машины, но и на генерирование, передачу и распределение энергии.

## **РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И НАЧАЛО ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Передача энергии к электродвигателям по проводам сделала заманчивой идею увеличения расстояния между источником и приемником. Начались и теоретические исследования в этой области, и практические шаги по передаче энергии, разумеется, постоянного тока.

Первая установка с передачей энергии на расстояние была сделана Ф.А.Пироцким (1845–1898) в 1874 г. в Петербурге. Энергия от локомобиля с генератором в 6 л.с. передавалась на 200 м, а затем на 1 км. Ф.А.Пироцкий предложил также передавать электроэнергию по рельсам рельсового транспорта. Энергия подводилась по двум изолированным друг от друга рельсам. В 1877 г. в «Инженерном журнале» Ф.А.Пироцкий опубликовал статью «О передаче работы воды, как двигателя, на всякое расстояние посредством гальванического тока». В 1880 г. проф. Д.А.Лачинов поместил в журнале «Электричество» статью «Электромеханическая работа». В 1881 г. к аналогичным с Д.А.Лачиновым выводам приходит француз Марсель Депре, сделавший на I-м международном конгрессе электриков доклад о передаче электрической работы на большие расстояния.

В 1882 г. Марсель Депре и немец Фрейлих сделали промышленную установку с передачей электроэнергии на расстояние 57 км между Мюнхеном и Мисбахом. Энергия от генератора мощностью 3 л.с. передавалась под напряжением 1,5-2 кВ по проводам диаметром 4,5 мм.

Применение электрического освещения создало потребность питания многих ламп от общего источника. Первыми работами по «дроблению света» были работы П.Н.Яблочкова. Поскольку много ламп все же не удавалось питать от одного генератора, то начали создаваться так называемые блок-станции, в которых одна паровая машина приводила во вращение 2-3 генератора. С этого времени начинается практическое применение электричества. Однако идея соз-

дания одной общей центральной станции (ЦЭС) была очевидна и технически и экономически. Д.А.Лачинов писал: «Универсальность электричества навела многих ученых на мысль об устройстве центрального завода, из которого электричество разносило бы во все концы города... свет, работу, химическую энергию».

Первая ЦЭС была построена в 1882 г. в Нью-Йорке под руководством Эдисона. В машинном зале было 6 генераторов мощностью около 90 кВт каждый, которые обеспечивали электроэнергией район площадью около 2,5 км<sup>2</sup>.

В России в Санкт-Петербурге первые ЦЭС появились в районе Невского проспекта. Первоначально они размещались на баржах на реках Мойке и Фонтанке, вследствие чего упрощалось водоснабжение и подвоз топлива, а также не требовалось земельного участка. В 1886 г. в Петербурге было учреждено «Общество электрического освещения 1886 г.», которое построило еще две электростанции: одну у Казанского собора, а другую на Инженерной площади. Мощность станций не превышала 200 кВт.

Расширение количества электроприемников потребовало решения целого ряда технических задач. В это время встает вопрос унификации напряжений. При дуговом освещении падение напряжения в дуге составляло 45 В. Для стабилизации горения дуги и ограничения тока короткого замыкания при зажигании последовательно с лампой включалось балластное сопротивление. Опытным путем было установлено, что падение напряжения на этом резисторе должно составлять 20 В. При последовательном соединении двух дуговых ламп необходимое напряжение составит  $45 \cdot 2 + 20 = 110$  В. Это напряжение и стало первой стандартной величиной.

Создание ЦЭС поставило вопрос о КПД при передаче электроэнергии, т.е. о ее экономичности. Первой такой работой было исследование Марсея Депре, который в 1880 г. показал, что КПД линии не зависит от ее сопротивления. В отличие от Депре Д.А.Лачинов доказал, что вывод Депре справедлив при увеличении напряжения в линии, т.е. при неизменной величине тока. Начинается создание линий передачи повышенного напряжения. В 1885 г. была построена линия Крейль – Париж для передачи мощности 50 л.с.

при напряжении 6 кВ на расстояние 56 км. КПД линии составляло 45 %. Позднее были построены линии передачи с КПД 75 %.

В 1882 г. Томас Алва Эдисон и Дж. Гопкинсон совместно разработали трехпроводную систему, в которой два генератора по 110 В соединялись последовательно и от средней точки выводился нейтральный или компенсационный провод. Между ним и основными проводами было напряжение 110 В, а между основными проводами – 220 В. При равенстве нагрузок в нейтральном проводе ток был равен нулю, а при неравенстве ток определялся как разность токов в основных проводах. Это давало возможность иметь нейтральный провод меньшего сечения (до 1/2, 1/3 от сечения основных проводов). Применение такой системы позволило увеличить радиус экономической передачи энергии до 1200 м.

По аналогии с этой системой стали создаваться многопроводные линии с большим числом последовательно соединенных генераторов, вплоть до четырех в пятипроводной линии. Это давало экономию меди проводов и позволяло увеличить радиус до 1500 м. Так исторически сложились величины напряжений 220, 330, 440, 550 В. Некоторые из них применяются редко (330 В), другие нашли узкую область применения. Так, городской трамвай имеет напряжение 550 В.

Потребность в повышении напряжения генераторов привела к увеличению скорости вращения и увеличению диаметров их якорей для увеличения линейной скорости проводников. Так как паровые машины, вращающие генераторы, были тихоходными, то стали применяться передачи для повышения скорости вращения – мультипликаторы, обычно ременные. Впоследствии отказались от паровых машин и стали использовать для вращения генераторов паровые турбины как более быстроходные.

Потребность в прокладке линий в черте городской застройки привела к расширению применения кабельных сетей, так как земля, потребная для воздушных линий, стоила очень дорого. Внедрению кабелей способствовало изобретение в 1839 г. Чарльзом Гудбиром вулканизации резины.

Повышение напряжения линий поставило задачу разделения этих напряжений между приемниками. Одним из способов такого

разделения было применение многопроводных линий, Распространение получило применение аккумуляторных подстанций, где в соответствии с напряжением линии последовательно включалось нужное число элементов. Линии, идущие к приемникам, подключались к другому числу элементов аккумуляторной батареи, которая одновременно служила источником резервного питания.

Увеличение мощности и протяженности линий потребовало создания технических средств их включения и защиты. Первыми средствами защиты были плавкие вставки. Первые отключающие аппараты представляли собою сосуды с ртутью, в которые опускались контактные стержни. Ртутные контакты применялись до 90-х гг. XIX в. Затем начинают применяться контактные аппараты типа рубильников. Один из первых автоматических выключателей был разработан М.О.Доливо-Добровольским в 1893 г. Аппарат имел пружинные контакты и отключающую пружину. Во включенном состоянии контакты удерживались защелкой, которая открывалась под действием электромагнита при больших токах; такое исполнение автоматических выключателей и максимальных токовых защит сохранилось в принципе до настоящего времени.

Возрастание величин отключаемых токов потребовало специальных способов для гашения дуги, возникающей при разрыве цепи. При напряжении более 15 кВ дуга поддерживалась постоянно. В 1912 г. М.О.Доливо-Добровольский предложил для гашения дуги деионную решетку, сочетающую свойства дугового разрядника и выключателя с многократным разрывом дуги.

В конце XIX в. было установлено, что хорошим средством быстрой деионизации является минеральное масло. В 1895 г. конструктор Себастьян Циани Ферранти разработал для Дептфордской (в окрестностях Лондона) электростанции первый масляный выключатель. В 1893 г. были выполнены трубчатые выключатели с газогенерирующей вставкой, а в 1897–1900 гг. фирмы Вестингауз и АЕГ разработали высоковольтные выключатели с воздушным дуговым.

С расширением практики электропередачи энергии стали выявляться недостатки постоянного тока, так как увеличение передаваемой мощности потребовало увеличения напряжения в линии для снижения потерь. Начинаются попытки создания высоковольт-

ных генераторов постоянного тока с напряжением до 7000 В. Дальнейшее повышение напряжения достигается за счет последовательного соединения генераторов. Применение таких систем предложил швейцарский инженер Фонтен Рене Тюри. Линии питали последовательно соединенные двигатели, приводившие в движение разные нагрузки: генераторы постоянного или переменного тока, группы механизмов. Создается линия Мутье – Лион длиной 180 км при напряжении 57,6 кВ и мощности 4630 кВт. Однако создание таких линий ограничивалось электроизоляционной техникой, особенно при ограниченных размерах пазов электрических машин. Возникают сложности с коммутацией (сейчас машины постоянного тока строят с напряжением до 1000 В). На месте потребления высокое напряжение постоянного тока трудно понизить или разделить между потребителями более низкого напряжения. В связи с этим возникает интерес к передаче энергии на переменном токе.

Первое промышленное применение переменного тока принадлежит П.Н.Яблочкову (1877). На основе идей П.Н.Яблочкова стали создаваться трансформаторы. Их применение позволило в системах переменного тока сделать независимыми напряжения источника, линии передач и приемников. В 1883 г. Люсьен Голард осуществил передачу энергии однофазного переменного тока для питания осветительных установок Лондонского метрополитена. На расстояние 23 км передавалась мощность 20 л.с. при напряжении 1,5 кВ. Для Гровенорской галереи была построена более мощная электростанция с двумя генераторами по 1000 кВт напряжением 2,5 кВ. В местах потребления напряжение понижалось до величины, отвечающей требованиям электроприемников.

Еще более мощная электростанция и линия передачи однофазного переменного тока была построена в Дерптфорде для передачи электроэнергии в Лондон в 1890 г. Общая мощность генераторов составляла 3000 кВт при напряжении 10 кВ. На четырех городских подстанциях напряжение понижалось до 2,4 кВ, а в домах у потребителей – до 100 В.

В России первая ЦЭС переменного тока была построена в 1887 г. в Одессе, в основном для освещения театра. Общая мощность двух синхронных генераторов составляла 160 кВт при напря-

жении 2 кВ. Энергия передавалась на расстояние 2,5 км до трансформаторной подстанции, где напряжение понижалось до напряжения 65 В, на которое были рассчитаны лампы накаливания. В том же году началась эксплуатация электростанции переменного тока в Царском Селе (г.Пушкин).

Крупнейшей в России электростанцией однофазного тока была станция на Васильевском острове в Петербурге, построенная в 1894 г. Мощность ее составляла 800 кВт. Применение напряжения 2 кВ позволило уменьшить сечение проводов до 58 мм<sup>2</sup> по сравнению с 400-600 мм<sup>2</sup> в сетях постоянного тока, увеличить радиус электроснабжения до 2 км при потере напряжения до 3 % (вместо 17-20 % в сетях постоянного тока).

Однако вместе с развитием систем электроснабжения на однофазном переменном токе расширялось применение двигателей постоянного тока, так как не было совершенных двигателей переменного тока. Поэтому начинаются работы по созданию и совершенствованию двигателей переменного тока. На первых этапах начинается разработка двигателей, подобных машинам постоянного тока. Таковы коллекторные двигатели Рудольфа Рихтера, Шраге, венгерских электротехников Макса Дери (1854–1934) и Отто Титуса Блати (1860–1938). Теория коллекторных машин переменного тока разрабатывалась Гергесом. С появлением однофазных синхронных генераторов делались попытки применения и однофазных синхронных двигателей. На Дерптфордской станции применялись такие двигатели, сконструированные Себастьяном Циани Ферранти, но для пуска на валу каждого из них приходилось ставить разгонный коллекторный двигатель.

Решающий шаг в широком распространении переменного тока сделали работы по применению многофазных токов.

В 1824 г. французский физик Ф.Д.Араго продемонстрировал вращение медного диска, увлекаемого за собой вращающимся постоянным магнитом. Ранее он показывал такой же опыт, но с магнитной стрелкой, вращение же медного диска стало возможным объяснить лишь через 7 лет, когда Фарадей обнаружил явление электромагнитной индукции. В 1879 г. английский ученый Уильям Бейли на заседании Лондонского физического общества сделал док-



лад «Способ получения вращения Араго». Бейли разместил по кругу 4 электромагнита с вертикально расположенными сердечниками, над которыми повесил медный диск. С помощью переключателя, приводимого во вращение вручную, производилось переключение электромагнитов, заставлявшее диск вращаться.

В 1883 г. французский физик Марсель Депре представил во Французскую академию наук теорему, доказывающую образование вращающегося магнитного поля двумя токами одинаковой амплитуды, но сдвинутыми по фазе на 90 градусов (т.е. двухфазным током). Эта работа не была замечена. Поэтому принцип создания вращающегося магнитного поля связывают с работами Галилео Феррариса (1847–1897) и серба Николы Тесла (1856–1943), которые независимо друг от друга повторно открыли это явление и создали на его основе первые двухфазные двигатели. 18 марта 1888 г. Феррарис сделал в Туринской академии доклад «Электродинамическое вращение, произведенное с помощью переменных токов». 16 мая того же года Тесла сделал доклад на аналогичную тему в Американском институте электроинженеров, но заявку на получение патента Тесла подал еще 12 октября 1887 г. Различие между работами Тесла и Феррариса в том, что Феррарис использовал индуктивности и емкости для получения сдвига фаз на 90 градусов, а Тесла построил двухфазный генератор переменного тока, имеющий две обмотки, сдвинутые на 90 градусов.

Работы Тесла и Феррариса привели к появлению целого ряда исследований, наиболее эффективными из которых были работы М.О.Доливо-Добровольского.

*Михаил Осипович Доливо-Добровольский* (1862–1919) родился в семье чиновника в Гатчине. В 1873 г. семья переехала в Одессу, где М.О.Доливо-Добровольский окончил реальное училище. Во время учебы М.О.Доливо-Добровольский увлекался химией. Семья Доливо-Добровольских часто отдыхала на Рижском взморье, поэтому Михаил Осипович поступил в 1878 г. в Рижский политехнический институт на химический факультет, но был исключен за участие в студенческих волнениях в год царевубийства (1881) без права поступления в вузы России. Уехав за границу, М.О.Доливо-Добровольский поступил в Дармштадтское высшее техническое

училище, где намеревался заниматься химией, но под влиянием профессора Киттлера увлекся сначала электрохимией, а затем электроэнергетикой. Во время обучения Киттлер привлекал лучших студентов к участию в выполнении заказов на проектирование электростанций, проверки смет на электротехнические установки и т.п.

После окончания института М.О.Доливо-Добровольский был оставлен ассистентом с чтением самостоятельного курса «Электрохимия с особым вниманием к гальванопластике и металлургии», но через непродолжительное время был приглашен на работу во Всеобщую электрическую компанию (AEG), в то время выделившуюся из компании Эдисона. Здесь он быстро выдвинулся и стал главным электриком (шеф-электриком) компании.

М.О.Доливо-Добровольский познакомился с работами Тесла в 1888 г. и продолжил работы Тесла и Феррариса, но придавал идеям более практичную форму; он стал применять сдвиг по фазе не 90, а 120 градусов и быстро пришел к трехфазной системе токов. М.О.Доливо-Добровольский разработал соединение нагрузки в трехфазной системе по схеме «звезда» и «треугольник». Надо сказать, что многофазные токи изучал ранее Тесла. Он указывал на возможность применения трехфазных токов, но считал, что двухфазная система экономичнее, так как требует применения четырех проводов, а трехфазная – шести. М.О.Доливо-Добровольский показал, что соединения в «звезду» или в «треугольник» позволяют обойтись тремя проводами.

В 1889 г. был разработан первый трехфазный двигатель, переделанный из машины постоянного тока. М.О.Доливо-Добровольский учел недостатки двигателя Тесла и сделал обмотки не сосредоточенными, а распределенными, что позволило получить более равномерное вращение магнитного поля в зазоре. Кроме того, он применил не медный ротор без обмотки, как в двигателе Феррариса (влияние диска Араго), а железный ротор с короткозамкнутой обмоткой. В германском патенте № 51083 М.О.Доливо-Добровольский запатентовал однослойную и двухслойную обмотки типа «беличья клетка». М.О.Доливо-Добровольский сразу же показал, что скорость вращения поля зависит от числа полюсов, и опытную машину можно было переключать на 2 или на 4 полюса, но была возможность получить 6 и 12 полюсов.

Для достижения наименьшего скольжения М.О.Доливо-Добровольский сделал обмотку ротора с минимальным сопротивлением, выполнив ее в виде «беличьей клетки». Так был создан асинхронный короткозамкнутый двигатель. Воздушный зазор его составил 1 мм, что в то время было смелым решением. В качестве генератора М.О.Доливо-Добровольский использовал машину постоянного тока, переделанную в синхронный генератор путем вывода трех равноудаленных точек обмотки якоря через три контактных кольца. Такие машины затем использовались как одноякорные преобразователи, сыгравшие определенную роль в развитии регулируемого электропривода. При разработке этой машины было показано, что в трехфазной системе сумма токов равна нулю, что и дало возможность использовать три провода.

М.О.Доливо-Добровольский так описывал впечатление от первого двигателя: «Уже при первом включении выявилось ошеломляющее для представителей того времени действие. Электродвигатель, ротор которого имел диаметр около 75 мм и длину также около 75 мм и не обладал никакими особыми присоединениями к сети, мгновенно стал вращаться на полное число оборотов и был совершенно бесшумным. Попытка остановить его за конец вала от руки блестяще провалилась, и только при особой ловкости было возможно воспрепятствовать таким способом его запуску при включении... Если принять во внимание малые размеры моторчика, это представлялось чудом для всех приглашенных свидетелей».

При испытании первых двигателей М.О.Доливо-Добровольский сразу же обнаружил зависимость механических свойств двигателя от сопротивления цепи ротора: либо он обладал низким пусковым моментом, но хорошо работал при нормальной скорости («слишком замкнут накоротко»), либо имел хорошие пусковые свойства, но более «мягкую» механическую характеристику. При малом сопротивлении роторной обмотки в ней возникает значительный ток, создающий свою намагничивающую силу, направленную встречно основной. Поток как бы «сдувает» в сторону. Это замечание М.О.Доливо-Добровольского очень интересно, так как явление «опрокидывания» связано именно с изменением фазы токов и потокосцепления.

Поэтому М.О.Доливо-Добровольский предложил машину «с переменной степенью короткого замыкания». Это была форма двигателя с фазным ротором и внешним добавочным сопротивлением. Чтобы при постоянной работе контактные кольца не создавали лишнего трения, М.О.Доливо-Добровольский предложил короткозамыкатель и подъем щеток после пуска. Для ограничения пусковых токов М.О.Доливо-Добровольский предложил пуск через автотрансформатор. Перспективной оказалась и другая разработка М.О.Доливо-Добровольского – выполнение обмотки ротора в виде «двойной беличьей клетки».

В 1891 г. на Франкфуртской электротехнической выставке была представлена система передачи энергии на трехфазном токе из Лауфена на реке Некар (приток Майна) во Франкфурт на Майне. Длина линии 170 км, провода воздушные, расстояние между опорами около 60 м.

В состав системы входили:

- водяная турбина мощностью 304 л.с.;
- трехфазный синхронный генератор 230 кВА, 95 В, соединение обмоток статора в «звезду», частота 30-40 Гц, 150 об/мин;
- повышающий трехфазный трансформатор 150 кВА, коэффициент трансформации 134;
- понижающий трехфазный трансформатор 150 кВА, коэффициент трансформации 116;
- трансформаторы для питания освещения и асинхронный короткозамкнутый двигатель мощностью 100 л.с. с числом полюсов, равным восьми, что соответствовало синхронной скорости 450-600 об/мин. Двигатель приводил во вращение гидронасос. На выставке имитировался водопад на реке Некар, приводивший во вращение турбину.

Напряжение в линии передачи вначале было 15 кВ, а затем после установки новых трансформаторов оно было доведено до 28,3 кВ. Напряжение приемников в конце линии передачи составляло 65 В. КПД линии – 75 %. Выключателей на линии не было. Защита была выполнена в виде плавких вставок (тонкие медные провода между двух опор, стоящих на расстоянии 2,5 м). При аварии в конце линии делалось искусственное короткое замыкание путем опускания

на провода углового замыкателя (металлический брус). При перегорании вставок в Лауфене возрастала скорость турбины и машинист выключал ее.

Короткозамыкатели в системах электроснабжения применяются и сейчас (системы с опережающим отключением, подстанции с короткозамыкателями и отделителями при наличии АПВ).

М.О.Доливо-Добровольский своими работами создал трехфазную систему со всеми ее компонентами: генератор, повышающий трансформатор, линия передачи, понижающий трансформатор и трехфазные двигатели. При этом двигатели со всеми их модификациями уже при М.О.Доливо-Добровольском получили вид, близкий к современному. Трансформаторы вначале применялись однофазные, но Доливо-Добровольский разработал, и по его идеям были построены и трехфазные трансформаторы вначале с симметричным, а затем и с несимметричным (стержневым) магнитопроводом.

М.О.Доливо-Добровольский участвовал в работе Первого электротехнического съезда (1899–1900) в Петербурге и выступил там с обширным докладом «О современном развитии техники трехфазного тока». С этих работ начинается внедрение в промышленность системы трехфазного тока. В своем докладе М.О.Доливо-Добровольский приходит к выводу, что «подобная разработанная до мелочей система должна все более и более завоевывать себе поле применений и захватывать понемногу все отрасли промышленности». Сейчас трехфазная система составляет основу электроэнергетики.

М.О.Доливо-Добровольский сделал целый ряд изобретений и в других разделах электротехники, а также внес вклад и в фундаментальную науку. Он разработал способ получения алюминия путем электролиза окиси алюминия (глинозема) при высоких температурах, сконструировал трехстержневой трехфазный трансформатор. В науку им внесен термин «вращающееся магнитное поле». Вначале это было выражение «Wechseldrehstorm» (вращающийся переменный ток), а затем просто «Drehstorm» (вращающийся ток). На Международном конгрессе электротехников М.О.Доливо-Добровольский показал преимущества представления любого переменного тока, как имеющего две составляющих: «рабочую» или «активную», совпадающую по фазе с напряжением, так и «безваттную» или «реактив-

ную», сдвинутую относительно напряжения на 90 градусов. Им был создан первый фазометр.

Создав трехфазную систему передачи электроэнергии, М.О.Доливо-Добровольский дал оценку и положительных ее свойств и недостатков. Он первый показал, что при увеличении длины линий и напряжения возрастают емкостные токи, которые при длине линии 350-500 км трудно компенсировать. В 1918 г. за год до смерти М.О.Доливо-Добровольский выступил с докладом «О границах применения переменных токов для передачи энергии на большие расстояния», в котором определил предельное напряжение линий – не более 200 кВ. Практика внесла коррективы в величину предельного напряжения, но, как и предсказывал ученый, при увеличении напряжения и длины линий приходится переходить к передачам на постоянном токе.

М.О.Доливо-Добровольский отличался высоким лекторским талантом. Когда в Петербурге создавался Политехнический институт, было намерение пригласить М.О.Доливо-Добровольского деканом электромеханического отделения (факультета). Об этом шли переговоры с будущим директором института А.Г.Гагариным. 20 июля 1900 г. канцелярия министерства финансов уведомляет М.О.Доливо-Добровольского о том, что министр «ввиду выраженного Вами согласия принести Ваши научные познания и Ваш обширный практический опыт на пользу служения отечественной науке изволил остановить на Вас свой выбор как на декане электромеханического отделения Санкт-Петербургского политехнического института». Однако многочисленные дела и незавершенные работы не позволили М.О.Доливо-Добровольскому сразу оставить работу в АЕГ, хотя он неоднократно приезжает в Петербург и консультирует временно исполнявшего должность декана проф. М.А.Шателена. В 1902 г. М.О.Доливо-Добровольский передал институту свою библиотеку периодической литературы и организовал снабжение лабораторий электротехническим оборудованием.

М.О.Доливо-Добровольский намеревался в 1903 г. переехать в Петербург, но этому помешала сердечная болезнь. После болезни он не решился переехать в Россию по личным обстоятельствам.

С 1909 г. М.О.Доливо-Добровольский снова работает в AEG, а в 1914 г. уезжает в Швейцарию, где его жизнь окончилась в 1919 г.

## **РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РОССИИ**

С созданием М.О.Доливо-Добровольским трехфазной системы появилась возможность передавать энергию на значительные расстояния, т.е. получать электроэнергию там, где это экономически выгодно, и передавать ее туда, где в ней имеется потребность. Такие идеи высказывали Н.Н.Бенардос, Ф.А.Пироцкий, Д.А.Лачинов. В первую очередь это касалось источников гидроэнергии, но, конечно, относится и к твердому топливу (трудно перевозить на большие расстояния золу, например, для сланцев, да и потери угля при перевозке велики).

В России первым предприятием, где начали применять трехфазный ток, был Новороссийский элеватор. Созданием системы в 1893 г. руководил инженер А.Н.Щенснович. Для питания сети использовались четыре синхронных генератора по 300 кВт.

В 1895–1896 гг. под руководством В.Н.Чиколева и Р.Э.Класона была построена гидростанция на Неве мощностью 300 кВт (два генератора по 125 кВт и 170 кВт, которые могли работать порознь и совместно) для освещения Охтинского порохового завода.

Первая в России линия передачи энергии длиной 21 км вела от реки Награ на Павловский прииск Ленского золотопромышленного района. Линия шла от синхронного генератора 98 кВт, 140 В. Для передачи напряжение повышалось до 10 кВ.

В 1899 г. введена в действие электростанция в Баку.

Увеличение числа электростанций и длины линий передачи электроэнергии создали условия для возникновения энергетических систем, объединявших электростанции, находящиеся на значительных расстояниях друг от друга.

В 1892 г. в Швейцарии были объединены в систему две электростанции в Гледфельдене (120 кВА) и Гохфельдене (360 кВА), находящиеся на расстоянии 2 км и соединенные линией с напряже-

нием 5 кВ. От этих станций подавалась энергия заводу фирмы «Эр-ликон», расположенному на расстоянии 24 км. Напряжение линии передачи 13 кВ. Возбуждение генераторов регулировалось с одного щита, т.е. создавался прообраз диспетчерского управления.

В 1913 г. в России были объединены в систему две электростанции: тепловая станция в Пятигорске и гидростанция «Белый уголь» на реке Подкумок. В работе по объединению станций в систему принимал участие М.А.Шателен. От объединенной системы питалось 400 уличных фонарей и 3000 ламп накаливания, насосы перекачки минеральных вод (30 электродвигателей общей мощностью 110 л.с.), трамвай в Пятигорске – 3 версты, Кисловодская грузовая дорога – 2 версты. Общая протяженность электрических линий составила 62 км.

Объединение электростанций дало ряд экономических преимуществ:

- унификация частоты и напряжения, а, следовательно, унификация параметров приемников;
- уменьшение потребности в резервах отдельных станций, возможность ремонта оборудования без отключения потребителей;
- возможность перераспределения нагрузки между гидро-, тепловыми электростанциями и разделения их на базисные и пиковые.

Более мощные энергосистемы в России появились в XX веке. Первая из них – это разветвленная система с кабельными сетями 20 кВ в Баку, питаемая двумя электростанциями: к 1914 году мощность одной из них достигла 36,5 МВт, другой – 11 МВт.

Московская энергосистема имела две станции: Московскую городскую и станцию «Электропередача» в г. Богородске (Ногинск), работавшую на торфе. В создании энергосистемы участвовал Р.Э.Классон (1868–1926).

С начала XX века создание энергосистем стало определяющим для прогресса электроэнергетики.

Развитие энергосистем, связанных длинными линиями со значительным индуктивным сопротивлением, поставило вопрос об устойчивости параллельной работы генераторов и о последствиях, наступающих при нарушении их синхронной работы. В этом случае начинается перегрузка отдельных генераторов или электростанций,



приводящая к их отключению от энергосистемы, т.е. развал системы. Такое событие произошло в 1965 г. в Нью-Йорке. Одним из путей повышения устойчивости является применение вставок постоянного тока. Возможно применение также электромеханических преобразователей.

В 1910 г. инженер Г.О.Графтио (1869–1949) разработал проект Волховской гидростанции с передачей энергии в Петербург. Начались также изыскательские работы по созданию электростанций на реках Свири, Днепре, Чусовой, Тереке, Вуоксе.

В 1918 г. создан Центральный электрический совет (ЦЭС), в который входили Г.О.Графтио, Шпергазе, А.А.Смуров, Егиазаров. К работам ЦЭС большое внимание проявил В.И.Ленин, поручивший руководство работой Г.М.Кржижановскому (1872–1959). В 1919 г. по поручению В.И.Ленина Г.М.Кржижановский опубликовал в «Правде» статью о торфе, а затем написал в правительство записку (изданную позже в виде брошюры) «Основные положения и задачи электрификации России».

11 февраля 1920 г. состоялось заседание ЦЭС с представителями Электроотдела ВСНХ, Наркомзема, Электротреста, Электростроя, Теплового комитета и др. Г.М.Кржижановский сообщил решение ВЦИК о создании Комиссии по электрификации для объединения работ «разрозненных групп» и направления их по государственному руслу.

Работа комиссии ГОЭЛРО поддерживалась правительством, которое вело широкую пропаганду его работы. Был создан «План электрификации России» (672 страницы текста с большим числом схем и графиков).

Разделы записки были следующими:

А. Электрификация и план Государственного хозяйства (Г.М.Кржижановский);

Б. Электрификация и тепло-, водоснабжение (Г.М.Кржижановский);

В. Электрификация и водное хозяйство (Г.М.Кржижановский);

Г. Электрификация и сельское хозяйство (Г.М.Кржижановский);

Д. Электрификация и транспорт (И.Г.Александров, Г.О.Графтио);

Е. Электрификация и промышленность (К.А.Круг, А.Г.Коган, Л.К.Рамзин).

Пояснительная записка к схематической карте электрификации составлена Е.Я.Шульгиным.

Программа выполнения плана ГОЭЛРО была рассчитана на 10-15 лет и состояла из двух частей:

Программа А – план восстановления и реконструкции довоенного электрохозяйства, увеличения мощности имеющихся электростанций, объединения их в системы, улучшения показателей;

Программа Б намечала сооружение 30 крупных районных паровых и гидростанций общей мощностью 1700 тыс. кВт.

Первенцем плана ГОЭЛРО стала Каширская ГЭС на подмосковном угле мощностью 12 тыс. кВт и линия передачи Кашира – Москва. Затем была построена Шатурская ГЭС на торфе и линия Шатура – Москва. Первая турбина этой ГЭС мощностью 16000 кВт была пущена 23 сентября 1925 г., а 13 октября была пущена вторая турбина, которая довела мощность станции до 32000 кВт. Затем были построены Волховская и Земо-Авчальская гидроэлектростанции.

В результате выполнения плана ГОЭЛРО был создан ряд энергосистем:

1. Мосэнерго – общей мощностью 820 тыс. кВт.
2. Донбассэнерго – 665 тыс. кВт.
3. Днепроэнерго – 610 тыс. кВт.
4. Горьковэнерго – 230 тыс. кВт.
5. Ленэнерго – 550 тыс. кВт.

В 1933 г. в системе Ленэнерго была введена первая линия от Свирской ГЭС до Ленинграда напряжением 220 кВ.

Укажем некоторые даты, характеризующие размах электрификации:

1927 г. – вступила в строй Кувшиновская ГРЭС, начато строительство Днепровской и Нижнесвирской ГЭС;

1928 г. – Ивановская ТЭЦ, Ярославская ГРЭС, Кондопожская и Ленинанская ГЭС;

1929 г. – Криворожская и Шахтинская ГРЭС;

1930 г. – Саратовская, Новороссийская, Харьковская, Челябинская, Ивановская, Белорусская ГРЭС;

1931 г. – Зуевская, Брянская ГРЭС, Березниковская и Кузнецкая ТЭЦ;

1932 г. – Днепровская ГЭС;

1933 г. – Воронежская ГРЭС, Казанская ГЭС;

1940 г. – Угличская ГЭС;

1942 г. – Новосибирская, Карагандинская, Челябинская, Кирово-Чепецкая ГРЭС;

1952 г. – Цимлянская ГЭС;

1958 г. – первая очередь Волжской ГЭС;

1961 г. – Братская ГЭС.

Первая атомная электростанция мощностью 5000 кВт была пущена в Обнинске в 1954 г.

### **РАЗВИТИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ РОССИИ**

Развитие сети электрических станций и энергетических систем потребовало создания и расширения специализированной производственной базы – электротехнических заводов, на основе которых возникла электротехническая промышленность России. Первые генераторы для Шатурской ГЭС поставили фирмы «Сименс-Шуккерт», а прочее оборудование покупалось у английских фирм.

На базе существующих в России заводов иностранных фирм и заново построенных были созданы крупные специализированные предприятия: «Электросила» и «Электрик» в Санкт-Петербурге; «Динамо» и Завод имени Ильича в Москве; Харьковский электромеханический завод и «Электротяжмаш»; Запорожский трансформаторный завод; «Сибтяжмаш» в Новосибирске; «Электромашина» в Прокопьевске; «Электроаппарат» в Санкт-Петербурге и Екатеринбурге.

В дальнейшем были построены крупные электротехнические заводы в Саранске, Чебоксарах, Баку, Ангарске, Тирасполе, Таллинне, Пскове и других городах.

К созданию электрооборудования привлекались ведущие ученые. На самих заводах появились специалисты, внесшие большой вклад в теорию электрических машин, аппаратов, полупроводниковых преобразователей, в создание и совершенствование электрооборудования, подготовку инженерных и научных кадров. Назовем несколько фамилий таких ученых, работавших в области теории электрических машин и электромашиностроения: *В.А.Толвинский* (синхронные машины, машины постоянного тока); *Л.М.Пиотровский* (синхронные машины, трансформаторы); *М.П.Костенко* (синхронные машины, асинхронные машины); *Р.А.Лютер* (синхронные машины, машины постоянного тока); *И.А.Сыромятников* (синхронные машины); *А.А.Горев* (синхронные машины); *Г.Н.Петров* (трансформаторы); *А.Е.Алексеев* (асинхронные двигатели, машины постоянного тока); *К.И.Шенфер* (машины постоянного тока); *В.Т.Касьянов* (машины постоянного тока); *О.Б.Брон* (машины постоянного тока, высоковольтные выключатели).

Работами русских ученых создаются все более мощные и современные электрические машины. Приведем в качестве примера повышение единичной мощности синхронных генераторов.

Турбогенераторы (скорость вращения 3000 об/мин) 1924 г. – 3000 кВА; 1927 г. – 5000 кВА; 1928 г. – 10000 кВА; 1930 г. – 24000 кВА; 1938 г. – 100000 кВА; 1950 г. – 150000 кВА с водородным охлаждением; 1959 г. – 300000 кВА с водородно-водяным охлаждением; 1964 г. – 500 МВА; 1969 г. – 800 МВА;

Сейчас для АЭС создаются генераторы мощностью 1000-1200 МВА.

Удельный расход материалов в 1938 г. для генератора 100 МВА составил 2,07 кг/кВА, а в 1964 г. для генератора 500 МВА – 0,67 кг/кВА.

Гидрогенераторы:

1926 г. – Земо-Авчальская ГЭС; 3,2 МВА; 214 об/мин (число пар полюсов  $p = 14$ ); 1926 г. – Свирская ГЭС; 24 МВА; 75 об/мин ( $p = 40$ ); Днепровская ГЭС; 62 МВА; 68,3 об/мин ( $p = 44$ ); 1948 г. – Днепровская ГЭС; 72 МВА; 83,3 об/мин ( $p = 36$ ); 1953 г. – Волгоградская ГЭС; 115 МВА; 63,3 об/мин ( $p = 44$ ); 1960 г. – Братская

ГЭС; 225 МВА; 125 об/мин ( $p = 24$ ); Красноярская ГЭС; 500 МВА; 93,8 об/мин ( $p = 32$ ).

Повышение мощности генераторов так же, как и других электрических машин, ограничивается их допустимым нагревом. Поэтому для турбогенераторов широко применяется водородное и водородно-водяное охлаждение. В ВНИИЭлектромаш под руководством академика И.А.Глебова проводились работы по созданию генераторов с криогенным охлаждением. Криогенный генератор мощностью 300 МВА разрабатывался в объединении «Электросила».

Передача энергии на большие расстояния сразу же поставила задачу повышения напряжения переменного тока до 110, 220, 330, 500, 750 кВ. Дальнейшее повышение потребовало перехода к передачам на постоянном токе на основе применения высоковольтных выпрямителей и инверторов. В свою очередь, это потребовало повышения электрической прочности изоляции, создания высоковольтных выключателей, дальнейшего изучения процессов в дуге и в длинных линиях, создания систем защиты от перенапряжения, грозозащиты.

Увеличение напряжений потребовало выпуска специальных кабелей для передачи электроэнергии в тех случаях, когда прокладка воздушных линий была невозможна (в городской черте, при пересечении широких водоемов и рек). Первые кабели имели изоляцию из резины или гуттаперчи. В 1884 г. был изготовлен первый одножильный кабель с изоляцией из пропитанной джутовой ткани. В 1880–1890 гг. распространение получает изоляция из пропитанной бумаги. В 1910–1920 гг. появляются оболочки из свинца, стальной ленты.

В 1919 г. изготовлен первый маслonaполненный кабель высокого напряжения. В 1931 г. в Ленинграде создан маслonaполненный кабель на напряжение 110 кВ. Появляются маслonaполненные кабели высокого давления на напряжение 110–500 кВ.

Для воздушных линий передачи медные провода заменяются алюминиевыми и сталеалюминиевыми.

Объединение станций в энергосистемы привело к необходимости исследования вопросов устойчивости систем, способов перераспределения нагрузки, специальных видов защит (например, на-

правленных) и сетевой автоматики (АПВ – автоматическое повторное включение, АВР – автоматическое включение резервного питания, АРЧ – автоматическая разгрузка по частоте).

В электрическом оборудовании начинает применяться полупроводниковая техника:

1904 г. – Джон Амброуз Флемминг разрабатывает двухэлектродную вакуумную лампу (диод);

1907 г. – на основе диода разрабатывается лампа с управляющей сеткой (триод);

1921 г. – Нижегородская радиолaborатория выполнила для Свердловской радиостанции стеклянные ртутные выпрямители на 4 кВ;

1926 г. – «Электросила» выпустила металлические запаянные ртутные выпрямители на 500 А и 600 В;

1930 г. – для Московского метрополитена были созданы мощные ртутные вентили на ток 5000 А, а в 1940 г. для питания нагрузок мощностью до 40000 кВт;

1926-1929 гг. – академик А.Ф.Иоффе создал твердые полупроводники медно-закисные (купроксные);

1938 г. – появляются селеновые выпрямители;

1940 г. – появляются германиевые выпрямители, затем кремниевые, выпускаемые в настоящее время на ток до 5000 А и напряжение до 4000 В;

1958 г. – в США появились первые интегральные схемы, а с 1962 г. начинается их серийный выпуск.

## **РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ НАУКИ И ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛЬНЫХ КАДРОВ**

Понятие «ЭДС» введено Алессандро Вольта.

Термин «электрический ток» ввел Андре Мари Ампер (1775–1836), он же ввел понятие направления тока.

Термин «сопротивление» ввел В.В.Петров.

Термин «электротехника» стал употребляться после Парижской международной электрической выставки в 1881 г.

Слово «энергия» было использовано Томасом Юнгом для обозначения величины  $mV^2/2$  (т.е. кинетической энергии). В 1860 г. Уильям Томсон (лорд Кельвин) стал применять это слово в современном смысле.

Английский физик Чарльз Уитстон (1802–1875) занимался методами измерения сопротивлений и создал знаменитый «мостик Уитстона». Он также применил регулируемые резисторы и дал им название «реостаты».

Луиджи Гальвани (1737–1798) создал первые гальванические элементы и исследовал влияние электричества на живую ткань. Отметим здесь и работу нашего соотечественника А.Т.Болотова (1738–1833) «Краткие и на опытности основанные замечания о электрицизме и о способности электрических машин к помоганию от разных болезней».

Майкл Фарадей, Шарль Франсуа Кулон, Э.Х.Ленц, Джеймс Джоуль, Генрих Симон Ом, Густав Роберт Кирхгоф, Жан Батист Био и Огюстен Савар определили ряд количественных соотношений в электротехнике. Э.Х.Ленц указал на значение ЭДС машины постоянного тока при электромеханических преобразованиях.

В 1821 г. профессор Берлинского университета Томас Иоган Зеебек (1770–1831) открыл термоэлектричество, а в 1834 г. французский ученый Жан Пельтье (1785–1845) открыл обратное явление. В 1838 г. Э.Х.Ленц, используя это явление, заморозил воду вокруг спая проводников.

В 1840 г. Джеймс Прескотт Джоуль открыл магнитное насыщение материалов.

В 1853 г. Герман Людвиг Гельмгольц начал применять принцип суперпозиции при расчетах. В этом же году Томсон (лорд Кельвин), изучая колебательные процессы, начал применять элементы гармонического анализа (ряды Фурье).

В 1873 г. Джеймс Кларк Максвелл сформулировал основные положения электромагнитной теории и изложил их в «Трактате об электричестве и магнетизме».

В 1874 г. Н.А.Умов (1846–1915) пишет работу «Уравнение движения энергии в телах».

В 1884 г. Дж. Пойнтинг формулирует основные законы теории электромагнитного поля.

В 1886 г. братья Гопкинсон создали методы расчета магнитной цепи машины постоянного тока.

В 1887 г. англичанин Гизберт Капп вывел формулу трансформаторной ЭДС.

В 1891 г. Энгельберт Арнольд создает теорию обмоток машин постоянного тока и выводит формулу для соотношения мощности, скорости электрической машины и ее геометрических размеров.

В 1891 г. М.О.Доливо-Добровольский вводит понятия активной и реактивной составляющих мощности.

В 1898 г. Галилео Феррарис опубликовал труд «Научные основы электротехники», который в 1904 г. был переведен на русский язык.

В 1899 г. профессор Томас Блексли (Гринвичский университет) предложил изображать переменный ток в виде вектора.

В 1901 г. Чарльз Протеус Штейнмец (США) предложил символический метод изображения векторов на комплексной плоскости; Штейнмец издал фундаментальный труд «Теоретические основы электротехники».

Оливер Хевисайд (1850–1925) – разработал операторные методы расчета.

В развитии электротехнического образования можно отметить следующие события:

1840 г. – по инициативе академика Б.С.Якоби при лейб-гвардии саперном батальоне создается особая учебная команда «для теоретического обучения гальванизму и способам применения его в военном употреблении»;

1856 г. – начинается подготовка инженеров по электротехнике в Главном инженерном училище военного ведомства (техническое гальваническое заведение);

1874 г. – создается минный офицерский класс в Кронштадте;

1884 г. – начинается подготовка инженеров по электротехнике в Петербургском технологическом институте;

1881 г. – в Петербурге организуется Телеграфное училище;

1886 г. – Телеграфное училище реорганизуется в Электротехнический институт.



С 1893 г. Михаил Андреевич Шателен (1866–1957) читал лекции по электротехнике в Электротехническом институте, а с 1901 г. – в Политехническом институте и одновременно в Горном институте. С 1895 г. лаборант М.А.Шателена Владимир Федорович Миткевич (1872–1951) работает в Горном институте. В 1902–1905 гг. в лабораториях Горного института он исследует дугу Петрова; затем начинает преподавать в Электротехническом институте.

С 1904 г. в Политехническом институте В.Ф.Миткевич читает курс «Теория электрических и магнитных явлений».

С 1915 г. в МВТУ курсы «Теория переменных токов» и «Электрические измерения» читает К.А.Круг (1873–1952).

## **РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИ**

## **ПРАКТИКИ ПРИВОДА**

Начиная с опытов Ампера, стала известна возможность превращения электрической энергии в механическую. Первый такой промышленной установкой был двигатель Б.С.Якоби. С этого времени начинаются работы по применению электричества и электрических двигателей, как источников механической энергии, т.е. в качестве электропривода.

После создания Антонио Пачинотти и Зенобом Теофилом Граммом совершенных по своим свойствам генераторов постоянного тока начинается распространение электрического привода машин и установок. Достижения электромеханики и созданные электро-механические устройства начинают внедряться в процессы производства.

На первых этапах электрический привод был по преимуществу групповым, т.е. имелся один двигатель, приводивший в движение группу механизмов через разветвленную систему механических передач, сцепных муфт и т.п. При групповом электроприводе общий двигатель вращался с постоянной скоростью, а потребное для той или иной машины регулирование скорости достигалось с помощью

коробок передач, наборов шкивов в ременных передачах и других механических устройств.

Вот как писал о таком цехе с групповым приводом писатель А.И.Куприн в повести «Молох»: «Кожаные приводы спускались там с потолка от толстого стального стержня, проходившего через весь сарай, и приводили в движение сотни две или три станков самых различных величин и фасонов. Этих приводов было так много, и они перекрещивались во стольких направлениях, что производили впечатление одной сплошной, запутанной и дрожащей ременной сети».

В дальнейшем стало ясно, что более просто и экономично передавать к каждой машине не механическую, а электрическую энергию, т.е. снабдить каждую машину или механизм индивидуальным двигателем; стали возникать и распространяться многодвигательные машины и агрегаты, в которых каждый привод выполняет свои специфические функции, приводя в движение определенную часть машины. Поскольку эти части используются в едином технологическом процессе (приводы подъема ковша и напора в одноковшовом экскаваторе, приводы перемещения рабочего органа по различным координатным осям в металлообрабатывающих станках, приводы в бумажных машинах, станах непрерывной прокатки и т.п.), то возникает понятие «взаимосвязанных электроприводов» и соответствующие теоретические положения для этих электроприводов.

Применение электродвигателей как источников энергии получает распространение во всех отраслях хозяйства и в военном деле.

В 1900 г. на подъемной установке Васильевского медного рудника (Урал) впервые устанавливается электрический двигатель, а к 1915 г. в Криворожском бассейне работает уже 61 электрический рудничный подъем.

Первую попытку применения электрических двигателей для рельсового транспорта сделал Ф.А.Пироцкий. Электрические трамваи в Европе появились в 1881 г., а в России в 1892 г. в Киеве между Подолом и Крещатиком (1,5 км). В Петербурге, несмотря на сопротивление конкурентов – владельцев конки, фирма инженера М.М.Подобедова построила первые линии в 1895–1902 гг. Линии прокладывались зимой по льду Невы, так как владельцы конки име-

ли право организации транспорта на всех улицах города. В 1902 г. линии конок перешли в руки городских властей и началось создание единой трамвайной сети. В 1907 г. в Петербурге началось регулярное движение трамваев. Первая линия была проложена от Адмиралтейской площади на Васильевский остров. Вагоновожатым первого вагона при открытии линии 16 сентября 1902 г. был инженер Г.О.Графтио. В 1904 г. в Москве конное движение было заменено трамвайным, а к 1914 г. в Москве было уже 129 км трамвайных линий.

В 1890 г. переведен на электрическую тягу Лондонский метрополитен. Начинаются попытки электрификации сначала пригородных, а затем и магистральных железных дорог. Для питания тяговых сетей применялись мотор-генераторные установки; широкое применение получили также одноякорные преобразователи, которые затем были вытеснены статическими выпрямителями: сначала ртутными, а затем полупроводниковыми.

В 1903–1904 гг. появилась теплоэлектрическая тяга для привода нефтеналивных барж «Вандал» и «Сармат», построенных Сортовским заводом.

С развитием индивидуального электропривода возникла возможность использования в технологических процессах регулирования скорости механизмов или отдельных их частей за счет регулировочных свойств электродвигателей.

Возможности и регулировочные свойства двигателей начали изучаться вместе с их применением. В 1883 г. Айртон и Пири опубликовали работу по вопросу регулирования скорости двигателей постоянного тока и показали основные математические связи между скоростью вращения и электрическими величинами. После проведения фундаментальных работ братьев Гопкинсон по расчету магнитной цепи машин и Арнольда по расчету обмоток начинается период широкого производства и применения машин постоянного тока.

Однако работы П.Н.Яблочкова и, особенно, М.О.Доливо-Добровольского показали перспективность применения для целей передачи и распределения электрической энергии переменного тока. Возникает параллельный, но противоречивый процесс развития двигателей постоянного тока и передачи энергии к ним – с помощью

переменного тока. Двигатели М.О.Доливо-Добровольского при всех их достоинствах не обеспечивали тех регулировочных качеств, которыми обладали двигатели постоянного тока.

В начале XX века в области применения регулируемых электроприводов постоянного тока начинает применяться электропривод с управляемым преобразователем переменного тока в постоянный. На первых порах этот преобразователь был электромеханическим: первичный двигатель переменного тока (трехфазный асинхронный или синхронный) вращал генератор постоянного тока. Вместе обе машины представляли собою преобразовательный агрегат (умформер). Системе присваивается название системы Леонарда или Вард-Леонарда по имени американского инженера, имевшего имя Ward Leonard. Эта система по своим регулировочным качествам и до сих пор является одной из лучших, благодаря чему такие электроприводы применяются до настоящего времени. В нашей технической литературе эта система получила название системы «генератор-двигатель» или сокращенно Г-Д.

Увеличение нагрузки в приводах системы Г-Д в ряде случаев создавало недопустимые перегрузки первичного двигателя. Для сглаживания нагрузки первичного двигателя на валу преобразовательного агрегата устанавливался маховик (система Леонарда – Ильгнера). В настоящее время такие электроприводы не применяются, так как мощность сетей обеспечивает значительные перегрузки; к тому же для снижения пиковых нагрузок можно использовать соответствующие законы регулирования скорости (например, изменение скорости при разгоне по параболическому закону).

Наличие в электроприводе преобразовательного агрегата усложняет установку, делает ее дороже. Промежуточные преобразования энергии сопровождаются потерями, что приводит к снижению КПД установки. Поэтому желание использовать регулируемые электроприводы переменного тока всегда было одной из тенденций развития электропривода. Возможность реостатного регулирования скорости асинхронных фазных двигателей была показана еще М.О.Доливо-Добровольским, и этот способ применяется до сих пор, хотя имеет очень низкую экономичность.

В 1893 г. Делендер предложил регулирование скорости трехфазных машин за счет изменения числа пар полюсов, что дает только ступенчатое регулирование скорости.

С конца прошлого века появился интерес к коллекторным двигателям переменного тока с параллельным возбуждением и к другим модификациям коллекторных машин. Появился регулируемый коллекторный двигатель с перемещающимися щетками, изобретенный одновременно Шраге и Рудольфом Рихтером (1910 г.) и усовершенствованный М.П.Костенко и Ямпольским.

В 1904 г. Кремер создал каскадную схему управления асинхронным фазным двигателем с применением машины постоянного тока и одноякорного преобразователя, что давало возможность регулирования скорости вниз примерно до 40 % от синхронной. В 1905 г. Шербиус дополнил этот каскад двумя разновидностями: каскадом с коллекторной машиной (машина Шербиуса) и каскадом с вынесенным преобразователем. Каскад Кремера и каскад Шербиуса с вынесенным преобразователем применяются и сейчас, однако, коллекторные одноякорные преобразователи в них заменены полупроводниковыми выпрямителями. Каскадные схемы по ряду показателей уступали электроприводу по системе Г-Д. Поэтому длительное время практика применения электропривода была следующей:

- для механизмов, не требующих регулирования скорости, или там, где регулирование достигалось без изменения скорости двигателя (вариаторы, коробки передач, гидровставки и др.), применялись двигатели переменного тока: асинхронные короткозамкнутые, асинхронные с фазным ротором в случаях, когда надо повысить плавность пуска или ограничить пусковой ток, а также синхронные двигатели для механизмов с редкими пусками;

- для механизмов, требующих регулирования скорости в широком диапазоне с высокой плавностью и требованиями к показателям качества регулирования (быстродействие, перерегулирование, статизм), применялась система Г-Д;

- в случаях, когда высокое качество не требовалось или допускалось ступенчатое регулирование, применялось реостатное регулирование асинхронных фазных двигателей или переключе-

ние числа пар полюсов у асинхронных короткозамкнутых двигателей;

- область применения каскадов – в основном для регулируемых электроприводов турбомеханизмов (центробежные насосы и вентиляторы, осевые вентиляторы, турбокомпрессоры).

Вместе с развитием электропривода появилась необходимость подготовки специалистов для проектирования электропривода, его обслуживания, монтажа, наладки, а также для решения теоретических и практических проблем, связанных с электрификацией машин, механизмов и установок.

В 1891 г. в Петербурге открылся Электротехнический институт. В 1900 г. профессор П.Д.Войнаровский и в 1903 г. профессор В.В.Дмитриев издали литографированные пособия по курсу «Электрическая передача и распределение механической энергии». В 1915 г. профессор В.В.Дмитриев издал курс «Электрическое распределение механической энергии на фабриках и заводах».

В 1922 г. в Электротехническом институте организуется специализированная кафедра электропривода, в настоящее время кафедра робототехники и автоматизации производственных систем.

Трудами профессоров С.А.Ринкевича и В.К.Попова создается фундаментальная теория электропривода. В 1925 г. проф. С.А.Ринкевич издает двухтомный труд «Электрическое распределение механической энергии». Эта работа положила начало оформлению электропривода как одного из направлений электротехники. Характерно, что в книге С.А.Ринкевича очень много внимания уделено механическому движению электропривода, нагрузочным диаграммам отдельных технологических машин и механизмов и даже особенностям технологии. Причина в том, что далеко не всегда механики уделяют этим вопросам достаточное внимание. При электрификации, и тем более при автоматизации, эти вопросы должны быть решены, чем и приходилось заниматься специалистам в области электропривода. В какой-то мере это особенность сохраняется и сейчас.

В 1928-1932 гг. профессор В.К.Попов издает фундаментальный трехтомный труд «Применение электродвигателей в промышленности». После Великой отечественной войны появляются учебники по электроприводу Д.П.Морозова, профессора А.Т.Голована.

Большую роль в подготовке специалистов в области электропривода сыграли ленинградские ученые. В 1956 и 1963 г. двумя изданиями выходит классический учебник «Основы электропривода», написанный профессорами В.П.Андреевым и Ю.А.Сабининым. В 1995 г. Ю.А.Сабинин и проф. С.А.Ковчин издают еще один учебник, учитывающий современное состояние техники и теории электропривода. В 1982 г. выходит учебное пособие «Управление электроприводами», написанное профессорами Электротехнического института А.В.Башариным, Г.Г.Соколовским, В.А.Новиковым.

Велики заслуги и Московского энергетического института. Профессора М.Г.Чиликин, А.С.Сандлер, В.И.Ключев порознь и вместе написали более 10 учебников по электроприводу («Общий курс электропривода», «Теория электропривода», «Теория автоматизированного электропривода»).

Для горных вузов учебник «Автоматизированный электропривод в горной промышленности» написали преподаватели Московского горного института профессор М.В.Мартынов и доцент Н.Г.Переслегин.

Несколько хуже обстоит дело с учебными пособиями по электроприводу горных машин и установок. Здесь можно указать фундаментальный труд проф. Ф.Н.Шклярского «Физико-механические основы электрического рудничного подъема». Учебник А.К.Малиновского «Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников» требует дальнейшего совершенствования. В учебнике В.М.Терехова и В.И.Ключева «Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов» не рассматривается специфика режимов и условий работы, а электроприводы подземных горнодобывающих машин вообще не упомянуты. Правда, этот учебник не предназначен для горных вузов. Имеется еще ряд учебных пособий по электроприводам отдельных классов горных машин. Эти пособия изданы в Санкт-Петербургском горном институте в 1976–1998 гг., но тиражи отдельных пособий не превосходят 300 экз.

Для решения теоретических и практических задач в области автоматизированного электропривода, создания материальной базы, проектирования, наладки и широкого внедрения современных систем электропривода были созданы специализированные заводы или

цехи (ЛЭО «Электросила», Харьковский электромеханический завод, завод «Динамо» в Москве, «Электромашина» в Прокопьевске, Ангарский завод комплектных устройств управления электроприводами), научные, исследовательские, проектные институты и КБ: ГПИ «Тяжпромэлектропроект», НИИ «Электросила», ОКБ завода им. Свердлова, ЭНИМС, ЦКБ «Электропривод», затем преобразованное во ВНИИЭлектропривод.

Укажем на основные тенденции развития современного электропривода:

А. Повышение единичной мощности электрических машин и электроприводов. В 1931 г. завод «Электросила» выпустил первый отечественный привод блюминга по системе Г-Д с маховиком (асинхронный двигатель мощностью 3680 кВт, два генератора по 3000 кВт и двигатель постоянного тока 7000 л.с.).

В настоящее время мощность двигателей постоянного тока достигает 5400 кВт в одноякорном исполнении и 6600 (2х3300) – в двухякорном. Мощность генераторов постоянного тока доходит до 5000 кВт, асинхронных короткозамкнутых двигателей – до 8000 кВт, синхронных до 9000 кВт. Для циркуляционных систем собственных нужд АЭС выпускаются синхронные двигатели мощностью 22000 кВт (25000 кВА). Мощности однофазных трансформаторов достигают 533000 кВА, трехфазных – 1250000 кВА.

Приведем примеры мощных приводов в горной промышленности.

Вентилятор ВЦ-4,5 имеет привод с синхронным двигателем мощностью 4000 кВт и асинхронным фазным двигателем в 500 кВт, разгоняющим вентилятор до половинной скорости.

Вентилятор ВЦД-47 «Север» имеет привод по системе асинхронного каскада, в состав которого входят: асинхронный фазный двигатель – 3150 кВт; двигатель постоянного тока – 1600 кВт; машина постоянного тока – 2200 кВт; синхронная машина – 2500 кВт.

Две последние машины в зависимости от режима управления вентилятором могут работать в двигательном или генераторном режимах.



Электропривод шагающего экскаватора ЭШ-100/100 выполнен по системе Г-Д. Для вращения генераторов установлены четыре синхронных двигателя по 3600 кВт. Привод поворота платформы этого экскаватора имеет 8 двигателей по 1000 кВт. Эти двигатели питаются от четырех генераторов – по два от каждого генератора.

Общая мощность электрических машин, установленных на гусеничном вскрышном экскаваторе ЭВГ 35/65, составляет около 23000 кВт, а наибольший из двигателей имеет мощность 3000 кВт.

Б. Применение регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока с различными видами преобразователей электрической энергии. Это приводы постоянного тока по системе Г-Д, с управляемыми ртутными и тиристорными преобразователями (УРВ-Д, ТП-Д). Для малых и средних мощностей широко применяются преобразователи на мощных транзисторах.

Электроприводы переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты в настоящее время вытесняют регулируемые электроприводы постоянного тока.

В. Производство специальных машин и микромашин для высокоточных электроприводов металлорежущих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), промышленных манипуляторов (роботов) включает специальные исполнительные двигатели, двигатели с полым якорем, с печатным якорем, шаговые двигатели, вентильно-индукторные двигатели.

Г. Изготовление электрических машин, ориентированных на применение в определенных условиях и для определенных технологических машин: специальные двигатели для горных комбайнов, крановые, экскаваторные, компрессорные двигатели, двигатели с различной степенью защиты от воздействия окружающей среды, в различных климатических исполнениях, для различных категорий помещений, модификации конструктивных исполнений по способу компоновки двигателя с рабочим механизмом (горизонтальные, вертикальные, с одним и двумя концами вала, фланцевые и т.п.).

Д. Автоматизация электроприводов, применение замкнутых систем управления для формирования заданных статических механических характеристик и качества переходных процессов. Повышение точности управления моментом, скоростью, положением на

основе перехода к дискретному, цифровому управлению. Применение ЧПУ, микропроцессорного управления. Создание ГАП, ГПС.

Применение систем управления с оптимизацией рабочих режимов не только электропривода, но и всей электромеханической системы на основе принципов подчиненного регулирования. Формирование динамики электроприводов переменного тока в системах с частотным векторным управлением и системах с прямым управлением моментом (*DTC*).

## **РАБОТЫ УЧЕНЫХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОРНОГО ИНСТИТУТА В ДЕЛЕ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ПОДГОТОВКИ КАДРОВ**

Развитие горной промышленности в России потребовало подготовки специалистов, умеющих руководить процессами разведки, добычи полезных ископаемых и их переработки. К середине XVII века окончательно назрела необходимость подготовки высококвалифицированных кадров для горного и горно-заводского дела.

Непосредственным поводом к основанию Петербургского горного института явилось обращение пермского рудопромышленника башкира Измаила Тасимова. В 1771 г. Тасимов «со товарищи» обратился в Берг-Коллегию с просьбой о разрешении разрабатывать казенные медные рудники и об учреждении Горного училища на том же основании, на каком учреждались Кадетские корпуса и Академии. На содержание училища «доколе последнее будет существовать» промышленники обещали платить с каждого пуда поставленной ими руды по полуполушке из получаемой на нее платы».

Президент Берг-Коллегии Михаил Федорович Соймонов в докладе Сенату обратил внимание на то, что открытие Высшей горной школы необходимо не только для Пермских рудников и заводов, но и для всего Горного корпуса и монетных дворов России. Челобитная Измаила Тасимова оказалась более чем своевременной.

Предложение Берг-Коллегии «О заведении горной школы» было одобрено Сенатом и представлено в виде доклада Екатерине II об учреждении Горного училища. К докладу прилагался план создания первого высшего учебного заведения, разработанный сенатором М.Ф.Соймоновым – одним из организаторов и первым директором

Института (Горного училища). Учебное заведение предполагалось назвать Горным училищем, а не Кадетским корпусом, а учащихся – студентами, так как в нем будут обучаться не только дворянские дети, но и дети разночинцев.

21 октября (1 ноября) 1773 г. доклад Сената об учреждении Горного училища при Берг-Коллегии был утвержден Екатериной II, подписавшей «Быть посему».

Первый Устав Горного училища заканчивался словами: «Берг-коллегия надеется, что выбранные ею учителя не оставят исполнить с ревностью свою должность, а учащиеся с их стороны показывать в науках успехи, и употребляя их к общей пользе, доказать усердие к услуге отечества и к пользе оного любовь; – долг, которого требует от них: благодарность, честность, закон и собственная их польза».

В 1804 г. Горное училище было переименовано в Горный кадетский корпус, а в 1833 г. – в Горный институт.

Расширение области применения электричества не могло не коснуться горной промышленности, тем более что для нее с особой остротой стояли вопросы и освещения, и передачи энергии, и применения электрифицированных механизмов.

Преподавание электротехники в Санкт-Петербургском горном институте началось с 1893 г. В журнале «Электричество» № 11-12 за 1898 г. опубликована статья профессора Михаила Андреевича Шателена (1866–1957) о преподавании электротехники в Горном институте Императрицы Екатерины II. В статье написано: «В 1893 году Совет Горного Института обратил внимание на то, что при постоянно увеличивающемся числе применений электричества к горнозаводскому делу, современному горному инженеру нельзя быть не знакомым с основами электротехники, и соответственно постановил ввести в Горном институте чтение курса электротехники... Осенью прошлого (1897) года сделано было обязательным и составление проектов по электротехнике». Объектом проектирования могло быть электрическое освещение завода, вокзала, жилого дома и т.п. На пятом курсе студенты по желанию могли также выполнить более обширный проект по тематике горного производства: проект «электрической откатки, электрической вентиляции, электрического откачивания вод.»

В институте была создана лаборатория электротехники. Кроме того, студенты имели возможность знакомиться с работой электростанции Горного института, которая обеспечивала его электроснабжение. Электростанция института имела один генератор постоянного тока (110 В, 300 А), а также аккумуляторную батарею резервного питания емкостью 174 А-ч.

В 1895 г. лаборантом к М.А.Шателену поступил *Владимир Федорович Миткевич* (1872–1951), выпускник физико-математического факультета Петербургского университета, впоследствии академик. В 1902–1905 гг. в лаборатории кафедры В.Ф.Миткевич исследовал дугу Петрова и создал теорию дугового разряда.

В преподавании электротехники участвовал *Александр Александрович Лацинский*, впоследствии профессор. В списках горных инженеров за 1910 г. он числится штатным ассистентом Горного института Императрицы Екатерины II. До 1929 г. А.А.Лацинский заведовал кафедрой электротехники, первое упоминание о которой относится к 1919 г., в 1929–1941 гг. заведующим кафедрой был доцент А.С.Чураев.

М.А.Шателен много занимался вопросами электрификации. В 1906 г. он опубликовал «Руководство к составлению проектов электрического освещения и электрического распределения механической энергии». Очень много М.А.Шателен работал в области освещения; в 1903 г. им составлен труд «Электрическое освещение больших площадей». Он занимался также нормами освещения в Международной комиссии по световым эталонам, принимал участие в работе всех комитетов и выставок по светотехнике, работал в области метрологии в Палате мер и весов, а с 1924 г. был ее председателем.

Выделение отдельной отрасли знаний по применению электрической энергии в горном деле относится к 1910 г., когда на кафедре горной механики, которой руководил заслуженный профессор И.А.Тиме (1838–1920), было начато чтение курса «Применение электричества в горно-заводском деле». Лекции с 1910 по 1924 г. читал горный инженер П.И.Шапирер.

М.А.Шателен и П.И.Шапирер составили первые в России «Правила для безопасного применения электрических установок на горных разработках и нефтяных промыслах».

В 1926 г. горный инженер и инженер-электрик Ф.Н.Шклярский (1883–1955) организовал в институте кафедру горной электротехники.

*Феликс Николаевич Шклярский* окончил Горный институт в 1911 г. по горному разряду, затем работал в Донбассе. В 1911 году он поступил в Санкт-Петербургский электротехнический институт и в 1917 г. его окончил. Одновременно с обучением Ф.Н.Шклярский работал в Горном департаменте и в Горном ученом кабинете. В 1918–1920 гг. заведовал разведочными работами в Липецком железорудном районе; в 1920 г. он был избран преподавателем, а в 1925 г. профессором Московской горной академии. В 1926 г. возглавил кафедру горной электротехники Ленинградского горного института, где и работал до 1955 г. В 1931 г. при кафедре была создана учебная лаборатория, в которой с 1931 г. по 1965 г. работал старшим лаборантом В.С.Федоров.

Ф.Н.Шклярский занимался исследованиями электрификации практически всех горных машин. Вот названия лишь некоторых его работ: «Электрификация рудничного подъема» (Союз горнорабочих, 1921); «О применении трехфазных асинхронных двигателей к рудничному подъему» (Вестник инженеров, 1925, № 2); «К вопросу о рудничной откатке электровозами» (Вестник инженеров, 1925, № 2); «Электрификация вращательного бурения» (Изд-во Московской горной академии, 1929).

В 1947 г. вышла книга акад. А.П.Германа и Ф.Н.Шклярского «Рудничные подъемные установки», в которой были обобщены теоретические основы статики, кинематики и динамики рудничного подъема, и основы его электрификации. В том же году в Записках горного института, а в 1952 и 1955 гг. в «Углетехиздате» был издан труд Ф.Н.Шклярского «Физико-механические основы электрического рудничного подъема», в котором исследовались режимы работы и способы управления электроприводами постоянного тока и асинхронными электроприводами во всех режимах работы подъемных установок. Книга эта не потеряла научной ценности и в наши дни.

В 1929 г. Ф.Н.Шклярский пригласил на кафедру горной электротехники А.Е.Максимова, а в 1932 г. – С.А.Алаторцева, впоследствии профессоров кафедры.

*Александр Евгеньевич Максимов* (1902–1990) представлял на кафедре направление развития теории и практики электропривода в горном деле. По инициативе и под руководством Ф.Н.Шклярского А.Е.Максимов начал заниматься вопросами применения гидроэлектропривода для горных машин. В 1947 г. на шахтах Ленметростроя были смонтированы подъемные установки с гидроэлектроприводом, которые эксплуатировались до начала 60-х годов. А.Е.Максимов был блестящим лектором, неоднократно отмечался как лучший лектор института.

*Святослав Алексеевич Алаторцев* (1906–1972) вошел в историю электрификации горной промышленности как инициатор электрификации открытых горных работ. Его книга «Рудничная электроэнергетика открытых горных разработок» (1954) заложила научные основы электроснабжения и распределения электроэнергии на карьерах, связала системы электроснабжения со способами и системами разработки. С 1955 по 1972 г. профессор С.А.Алаторцев заведовал кафедрой горной электротехники, в течение ряда лет был деканом горно-электромеханического факультета, сделал очень много для совершенствования подготовки кадров инженеров электромехаников и электриков в своем институте и в России.

По инициативе проф. С.А.Алаторцева в институте были начаты исследования электроприводов одноковшовых экскаваторов (А.Д.Школьников, А.С.Соловьев).

Доцент кафедры горной электротехники *Георгий Иванович Покровский* работал на кафедре с 1936 по 1962 г. и преподавал системы рудничной сигнализации, связи, СЦБ на подземном локомотивном транспорте. Под его руководством в институте были начаты работы в области электробезопасности и были разработаны первые виды защит от однофазных замыканий на землю в рудничных сетях (аспирант А.Я.Фанин); затем в этих работах участвовали доценты В.И.Гвоздев, К.Б.Мусс, В.П.Ганский и ряд аспирантов. Эти работы привели к разработке новых оригинальных систем направленных защит от однофазных замыканий на землю (доцент В.П.Ганский).

Под редакцией проф. Ф.Н.Шклярского был подготовлен и в 1939 г. издан первый учебник по электрификации горной промышленности «Горная электротехника» (авторы С.А.Алаторцев, А.Е.Максимов, Г.И.Покровский).

В 1965 г. кафедра горной электротехники была переименована в кафедру электрификации горной промышленности. В разные годы на кафедре работали доценты: Н.К.Смирнов (с 1942 г.), В.И.Гвоздев (с 1951 г.), А.С.Соловьев (с 1958 г.), В.И.Бочаров (с 1964 по 1969 г.), К.Б.Мусс (с 1968 по 1979 г.), ассистенты Е.Я.Луганцева (с 1952 по 1972 г.) и К.К.Екимов (с 1952 по 1955 г.).

В 1969 г. кафедра электрификации горной промышленности была разделена на кафедру электроснабжения горных предприятий, которую возглавил проф. С.А.Алаторцев, и кафедру электрических машин и автоматизированного электропривода, для руководства которой был приглашен профессор В.В.Рудаков (1918–1997).

В 1972 г. кафедру электроснабжения возглавил проф. Д.А.Башкиров, а с 1976 г. – проф. С.П.Васильевский. В 1982 г. кафедра была объединена с кафедрой электротехники в кафедру – электротехники и электроснабжения горных предприятий, которую возглавил проф. О.В.Иванов.

Профессор А.В.Рысьев (1908–1986), возглавлявший кафедру электротехники, свои работы посвятил в основном рудничной электровозной тяге. Им и его учениками – профессором В.Н.Кордаковым, доцентом Б.Г.Анискиным, доцентом О.Б.Лакотой выполнен ряд исследовательских работ по совершенствованию рудничных электровозов и автоматизации электровозной откатки, расчету электрических нагрузок тяговой сети, совершенствованию рудничных электровозов. Эти работы продолжают профессор В.Н.Кордаков и доцент О.Б.Лакота, работающие в настоящее время на кафедре автоматизации производственных процессов.

Профессор О.В.Иванов (1928–1999), доценты В.Г.Бауман (1922–1999) и Б.И.Комаров проводили обширные работы по исследованию электрических нагрузок и энергопотребления на горных предприятиях и методов повышения энергетических показателей. Эти работы вылились в разработку систем продольной и поперечной емкостной компенсации, что позволило не только улучшить энерге-

тические показатели, но и снизить потери напряжения в распределительных сетях. Эти работы были начаты в сланцевых бассейнах Эстонии и Ленинградской области, на Оленегорском ГОКе; системы емкостной компенсации внедрялись в производственном объединении «Белорускалий». В настоящее время работы по повышению энергетических показателей систем электроснабжения возглавил профессор Б.Н.Абрамович. Эти работы внедряются в объединении «Татнефть». Для нефтяных промыслов характерны рассредоточение добывающих участков на значительном расстоянии и длинные линии электропередачи, вследствие чего повышение эффективности систем электроснабжения дает значительный экономический эффект.

В 1959 г. в Ленинградском горном институте была создана кафедра автоматизации производственных процессов, заведующим которой стал профессор А.Е.Максимов. Затем в течение долгих лет эту кафедру возглавлял профессор Е.С.Кричевский (1916–1998), а в настоящее время кафедрой заведует профессор Р.М.Проскуряков. На кафедре автоматизации производственных процессов под руководством профессора Е.С.Кричевского сложилась школа контроля влажности на основе высокочастотных измерений.

Контроль влажности продуктов горно-обогачительного производства имеет существенное значение, позволяя получить оптимальное качество продукции в процессе ее сушки и избежать излишнего расхода энергии в обезвоживающих и сушильных установках. Научная школа влагометрии кафедры АПП получила признание в нашей стране и за ее пределами. На кафедре были разработаны системы контроля влажности угля, железного концентрата, апатита, фосфорита, продукции никелевого производства.

Интересные и практически важные работы проводились по разработке датчиков для контроля и управления технологическими процессами: влагомеров, используемых при автоматизации процессов сушки продуктов, датчиков содержания полезного компонента в фосфоросодержащих рудах и концентратах, датчиков для определения веса руды непосредственно в кузове автосамосвалов (доценты В.А.Гарdziш, М.А.Семенов).



Кафедру электрических машин и автоматизированного электропривода с 1969 по 1990 г. возглавлял профессор В.В.Рудаков, а с 1990 г. – профессор А.Е.Козярук. Основным научным направлением кафедры является разработка теории электропривода, создание и внедрение современных систем автоматизированного электропривода для горных машин и механизмов. Это – системы подчиненного регулирования с последовательной коррекцией для электроприводов постоянного и переменного тока с управляемыми полупроводниковыми преобразователями.

Работы кафедры в области частотно-векторного управления электроприводами переменного тока создали кафедре широкую известность в электротехнических организациях и у специалистов в этой области. В создании и совершенствовании этих систем принимали участие профессор В.В.Рудаков и А.Е.Козярук, доценты В.А.Дартау, И.М.Столяров, Ю.П.Павлов, В.В.Алексеев, А.П.Емельянов, с.н.с. З.Б.Слепцова, к.т.н. Т.О.Россо. Аппаратурная реализация систем управления основана на аналоговых элементах и элементах дискретного (цифрового) управления, что создает возможности применения микропроцессоров и ЭВМ для управления электроприводами. Большое количество авторских свидетельств на изобретения получено на элементы систем частотно-векторного управления, таких как измерители величины и мгновенного положения вектора потокосцепления, тригонометрические анализаторы, преобразователи координат и др. (доценты В.А.Дартау и В.В.Алексеев), а также на преобразователи частоты с расширенным диапазоном регулирования (доцент Ю.П.Павлов, к.т.н. А.В.Шипулин).

Другим направлением работ кафедры ЭМАП были исследования электроприводов как электромеханических систем, т.е. изучение динамики не только электрической, но и механической части машин и установок с учетом упругости элементов трансмиссии. Эти работы велись в первую очередь применительно к электроприводам одноковшовых экскаваторов доцентами А.С.Соловьевым, Е.В.Распоповым, Н.А.Амбарцумяном и позволили создать системы управления с оптимизацией режимов работы электромеханических систем и ограничением динамических нагрузок. В сотрудничестве с институтом ВНИИЭлектромаш выполнены работы по исследованию ре-

жимов работы экскаваторных генераторов при разработке новой серии генераторов типа ГПЭ.

Большие работы велись в области совершенствования электрических приводов для горных комбайнов (профессор Э.А.Загивный, доценты Я.П.Гринберг, В.А.Дартау, В.С.Соловьев). На основе этих работ определены рациональные характеристики двигателей забойных машин.

Кафедрой начаты работы по созданию систем управления электроприводов для добычи полезных ископаемых (жидких, твердых и газообразных) на океаническом шельфе, а именно, на подводных машинах и буровых платформах.

Кафедра активно сотрудничает с Петербургским Метростроем и Метрополитеном. Для Метростроя были разработаны и внедрены электроприводы подъемных машин, а для Метрополитена проводились работы по совершенствованию электроприводов эскалаторов и подготовке специалистов для работы в эскалаторной службе.

## КРАТКИЙ ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

*Абрамович Борис Николаевич*, профессор Санкт-Петербургского государственного горного института.

*Алаторцев Святослав Алексеевич* (1906–1972), профессор Ленинградского горного института.

*Александров Иван Гаврилович* (1875–1936), академик АН СССР (1932), энергетик, гидротехник, участник разработки плана ГОЭЛРО.

*Алексеев Александр Емельянович* (1891–1975), член-корреспондент АН СССР, профессор Ленинградского института железнодорожного транспорта, энергетик и электротехник, специалист в области электрических машин и электрической тяги.

*Ампер Андре Мари* (1775–1836), Франция, член Петербургской академии наук (1830), физик, математик, один из основоположников электродинамики, построил первую теорию магнетизма, установил закон механического взаимодействия токов.

*Андреев Владимир Петрович* (1902–1958), профессор, заведующий кафедрой электрооборудования промышленных предприятий Ленинградского политехнического института.

*Андронов Александр Александрович* (1901–1952), академик АН СССР (1946), физик, создатель теории нелинейных колебаний.

*Араго Доминик Франсуа* (1786–1853), Франция, физик, политический деятель, открыл магнетизм вращения.

*Арнольд Энгельберт* (1856–1911), Германия, профессор электротехнического института в Карлсруэ, электрик.

*Бабат Георгий Ильич* (1911–1960), профессор ВЗСИСи, популяризатор электротехники.

*Багаутдинов Геннадий Атрахманович*, профессор Уральской государственной горной академии.

*Бардин Джон* (р.1908), США, член АН СССР, лауреат Нобелевской премии (1956) совместно с У.Браттейном и У.Шокли, лауреат Нобелевской премии (1957) совместно с Л.Купером и Дж. Шиффером, физик, изобретатель транзистора (1948), один из авторов микроскопической теории сверхпроводимости.

*Барлоу Питер* (1776–1862), изобрел электродвигатель «колесо Барлоу» (1824).

*Баширин Артемий Васильевич*, профессор, заведующий кафедрой робототехники и автоматизированных производственных систем (до 1986 г.) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.

*Баширов Дмитрий Анисимович* (1920–1976), профессор, заведующий кафедрой электроснабжения горных предприятий (1972–1976) Ленинградского горного института.

*Беккария Джованни-Батиста* (1716–1781), Италия, выдвинул гипотезу о связи электричества и магнетизма.

*Беккерель Антуан Сезар* (1788–1878), Франция, физик, труды по философии, флуоресценции и термоэлектричеству.

*Белл Александр Грейам* (1847–1922), Шотландия, США, физик, один из изобретателей телефона, получил патент на первый пригодный телефон (1876).

*Бенардос Николай Николаевич* (1842–1905), физик, изобретатель и один из создателей дуговой электрической сварки металлов.

*Био Жан Батист* (1774–1862), Франция, почетный член Петербургской академии наук, физик, сформулировал законы термодинамики, изучал магнитное поле электрического тока.

*Блати Отто Титус* (1860–1939), Венгрия, изобрел трансформатор и счетчик электрической энергии.

*Бодо Жан Морис Эмиль* (1845–1903), Франция, изобрел буквопечатающий телеграфный аппарат.

*Болотов Андрей Тимофеевич* (1738–1833), ученый, писатель, основатель русской агрономической науки.

*Бонч-Бруевич Михаил Александрович* (1888–1940), профессор Ленинградского электротехнического института, один из пионеров радиотехники.

*Борель Эмиль* (1871–1956), Франция, математик, изобрел индукционный счетчик.

*Боргман Иван Иванович* (1849–1914), первый выбранный ректор Петербургского университета, проводил исследования в области электричества и магнетизма, конструировал трехфазные машины (1892).

*Бош Роберт* (1861–1942), Германия, электротехник, основатель фирмы автомобильной электротехники «Роберт Бош».

*Бранли Эдуард* (1859–1927), Франция, физик, изобрел когерер (1891).

*Браславский Исаак Яковлевич*, профессор Уральского государственного технического университета.

*Браттейн Уолтер* (1902–1987), США, лауреат Нобелевской премии (1956), изобрел транзистор (1948).

*Бреге Луи Франсуа* (1804–1883), Франция, владелец и технический руководитель мастерской часов и точных приборов; в 1874 г. за изобретения в области электротехники был избран экстраординарным членом Парижской академии наук.

*Бреш Чарльз Френсис* (1849–1929), Англия, предложил шихтованный якорь (1878).

*Брон Осип Борисович*, профессор Северо-Западного политехнического института.

*Броун Чарльз Юджин Ленслот* (1863–1924), главный инженер фирмы «Эрликон», конструировал трехфазные машины.

*Важнов Александр Иванович* (1918–1977), профессор, заведующий кафедрой электрических машин (1977) Ленинградского политехнического института.

*Ван-Депуль*, США, предложил осуществить питание электро-транспорта от контактного провода (1833).

*Варбург Эмиль Габриэль* (1846–1931), Германия, физик, профессор Берлинского университета; президент Физикотехнического института в Берлине; открыл явление гистерезиса (1881).

*Варлей Карнелий* (Варжи Кромвель) (1828–1883), Англия, предложил описание принципа самовозбуждения генератора (1866).

*Васильев Александр Сергеевич*, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.

*Васильевский Сергей Петрович* (1916–1980), профессор, заведующий кафедрой электроснабжения горных предприятий (1978–1980) Ленинградского горного института.

*Вебер Вильгельм Эдуард* (1804–1891), Германия, член-корреспондент Петербургской академии наук (1853), физик, разработал совместно с К.Ф.Гауссом систему электрических и магнитных единиц.

*Веденеев Борис Евгеньевич* (1884–1946), главный инженер строительства ДнепрогЭС, ответственный редактор журнала «Электричество».

*Винтер Александр Васильевич* (1878–1958), академик АН СССР (1932), энергетик, строитель Шатурской и Днепровской электростанций.

*Войнаровский Павел Дмитриевич* (1866–1913), профессор и директор Ленинградского электротехнического института.

*Вологдин Валентин Петрович* (1881–1953), профессор Ленинградского электротехнического института, специалист по высокочастотной технике, электротермии.

*Вологдин Виктор Петрович* (1883–1950), профессор Владивостокского политехнического института, основоположник электродуговой сварки корпусов судов.

*Вольта Алессандро* (1745–1827), Италия, физик, физиолог, один из основателей учения об электричестве, создал первый химический источник тока, открыл контактную разность потенциалов.

*Вольдек Александр Иванович* (1911–1977), профессор, академик Академии наук Эстонской ССР, заведующий кафедрой электрических машин (1961–1977) Ленинградского политехнического института.

*Воронов Аvenir Аркадьевич* академик АН СССР (1970), заместитель директора Института электромеханики, специалист в области теории автоматического управления.

*Воронов Александр Александрович* (1860–1923), профессор Ленинградского электротехнического института, специалист по электрическим машинам.

*Гаккель Яков Модестович* (1874–1945), профессор Ленинградского электротехнического института, специалист в области электро тяги, строитель мощного дизель-электровоза.

*Галилей Галилео* (1564–1642), Италия, физик, поэт, филолог, математик, художник, один из основателей точного естествознания.

*Гальвакс Вильгельм* (1859–1922), Германия, физик, открыл фотоэлектрический эффект.

*Гальвани Луиджи* (1737–1798), Италия, физик, анатом, физиолог, один из основателей учения об электричестве, основоположник экспериментальной электрофизиологии.

*Гаусс Карл Фридрих* (1777–1855), Германия, математик, физик, исследовал электричество и магнетизм, создал первый в Германии электромагнитный телеграф.

*Гафиятуллин Рафаиз Хазеевич*, профессор, Южно-Уральский государственный университет.

*Гебель Генрих* (1817–1893), немецкий эмигрант в США, изобрел лампу накаливания (1854).

*Гейлер Лев Борисович*, профессор Белорусского политехнического института.

*Гельмгольц Герман Людвиг* (1821–1894), Германия, физик, математик, психолог, сформулировал законы сохранения энергии, известен работами в области аэродинамики электромагнетизма.

*Генри Джозеф* (1797–1878), США, электротехник, работал над электромагнитами, открыл явление самоиндукции, колебательный характер разряда конденсатора.

*Герике Отто фон* (1602–1686), Германия, физик, изобрел воздушный насос, водяной барометр, построил электрическую машину.

*Герц Генрих Рудольф* (1857–1894), Германия, физик, один из основоположников электродинамики, разработал учение об электромагнитных волнах, открыл фотоэффект.

*Гейснер-Альтенек Фридрих* (1845–1904), Германия, предложил свечу как единицу силы света.

*Гиббс Эдуард Диксон*, Франция, банкир, получил патент на трансформаторы (1882), трансформаторы Гиббса и Голяра демонстрировались в 1883 г. в Лондоне в Вестминстерском аквариуме.

*Гильберт Уильям* (1544–1603), Англия, физик, врач, изучал магнитные и электромагнитные явления.

*Глазенко Татьяна Анатольевна* (1924–1999), профессор, заведующая кафедрой электротехники и прецизионных электромеханических систем (1965–1990) Санкт-Петербургского института точной механики и оптики.

*Глазунов Александр Александрович* (1891–1960), профессор Московского энергетического института, участник строительства электростанций по плану ГОЭЛРО и высоковольтных ЛЭП.

*Глебов Игорь Алексеевич*, академик АН СССР, ВНИИЭлектромаш.

*Голован Андрей Тимофеевич* (1900–1963), профессор Московского энергетического института.

*Голард (Голяр) Люсьен* (1850–1888), Франция, получил патент на трансформаторы (1882).

*Гопкинсон Джон* (1849–1898), Англия, физик, исследовал эффект Холла, занимался проблемами электрического освещения и механики, разработал метод «ярма» для магнитных измерений.

*Гопкинсон Эдвард* (брат Джона Гопкинсона), Англия, физик, создал первую конструкцию трансформатора с замкнутой магнитной системой (1884).

*Гордон Джон* (1852–1893), Англия, инженер, конструировал двухфазные генераторы (1882).

*Горев Александр Александрович* (1884–1953), профессор, заведующий кафедрой техники высоких напряжений Ленинградского политехнического института, электромеханик, основоположник современной теории электромеханических преобразований, лауреат Сталинской премии (1947).

*Грамм Зеноб (Зиновий) Теофил* (1826–1901), Бельгия, Франция, электротехник, получил патент на электрогенератор, основал производство электромагнитов.

*Графтио Генрих Осипович* (1869–1949), академик АН СССР, один из пионеров гидроэнергетического строительства, профессор Ленинградского электротехнического института, один из основных разработчиков плана ГОЭЛРО.

*Грей Стефан* (1670–1736), Англия, проводил опыты по электризации.

*Грондаль Ларс* (1880–?), США, физик, создал первый выпрямитель с запирающим слоем на границе меди с закисью меди – купроксный выпрямитель.

*Гротгус Кристиан Иоганн Дитрих Теодор фон* (1785–1822), физик, химик, сформулировал первую теорию электролиза (1805).



*Грузов Леонид Николаевич* (1906–1956), профессор Ленинградского политехнического института, инженер-полковник, заведующий кафедрой энергетики военных установок связи, заместитель проректора по учебной и научной работе Военной академии связи.

*Гудиир Чарльз* (1800–1860), США, предложил вулканизацию каучука (1839).

*Данилевич Янош Брониславович*, академик АН РФ, известный ученый в области электроэнергетического машиностроения.

*Даниэль Джон Фредерик* (1790–1845), Англия, ученый и изобретатель, профессор Лондонского университета, исследовал гальванические элементы.

*Д'Арсонваль Жак Арсен* (1851–1940), Франция, биофизик, физиолог, построил гальванометр с неподвижным магнитом и подвижной катушкой.

*Девенпорт Томас* (1802–1851), США, техник, изобрел двигатель Девенпорта (1837).

*Деву Хемфри* (1778–1829), Англия, обнаружил нагрев проводника током.

*Демирчян Камо Серопович*, академик РАН, Институт высоких температур Академии наук РФ.

*Депре Марсель* (1843–1918), Франция, физик, электротехник, обосновал возможность передачи и распределения электроэнергии по проводам на большие расстояния, построил первую ЛЭП на постоянном токе (1882).

*Дери Микша* (1854–1938), Венгрия, создал однофазный генератор с самовозбуждением от механического выпрямителя.

*Джоуль Джеймс Прескотт* (1818–1889), Англия, физик, экспериментально обосновал закон сохранения энергии, определил механический эквивалент тепла.

*Дивиш Прокоп* (1698–1795), Чехия, естествоиспытатель, создатель электростатической машины.

*Динкель Альфред Данилович*, профессор Пермского государственного технического университета.

*Дмитриев Владимир Владимирович* (1873–1946), профессор Ленинградского электротехнического института.

*Доливо-Добровольский Михаил Осипович* (1862–1919), электротехник, создатель техники трехфазного переменного тока, создал трехфазный АД (1888–1889), осуществил первую электропередачу трехфазного тока (1891).

*Дюфе Шарль Франсуа* (1698–1739), Франция, изобрел электроскоп, магнитометр, открыл существование двух родов электричества.

*Ефимов Игорь Григорьевич*, профессор Санкт-Петербургского государственного технического университета.

*Жданов Петр Сергеевич* (1903–1949), профессор Московского энергетического института.

*Жук Сергей Яковлевич* (1892–1957), академик АН СССР (1953), энергетик, гидростроитель (Цимлянская ГЭС, ГЭС Волжского каскада).

*Завалишин Дмитрий Александрович* (1900–1968), профессор, член-корреспондент АН СССР, заведующий кафедрой электрических машин Ленинградского института авиационного приборостроения.

*Загрянный Эдуард Анатольевич*, профессор Санкт-Петербургского государственного горного института.

*Зеебек Томас Иоганн* (1770–1831), Германия, физик, открыл термоэлектричество.

*Зинстеден Вильгельм Иозеф* (1803–1891), Германия, физик, врач, предложил замену постоянных магнитов в электрических машинах электромагнитами.

*Иванов Гелий Михайлович*, ведущий специалист ВНИИЭлектропривода, доктор технических наук.

*Иванов Олег Всеволодович* (1928–1999), профессор, заведующий кафедрой электротехники и электроснабжения горных предприятий (1982–1999) Санкт-Петербургского государственного горного института.

*Иоффе Абрам Федорович* (1880–1960), академик АН СССР (1953), первый директор Физико-технического института, физик, пионер исследований в области полупроводников.

*Иедлик Аньош Иштван* (1800–1895), Венгрия, физик, исследовал самовозбуждение генераторов постоянного тока (1856 г.).

*Ильинский Николай Федотович*, профессор Московского энергетического института.

*Кавендиш Генри* (1731–1810), Англия, физик, ввел понятие электрического потенциала, изучил взаимодействие электрических зарядов, предвосхитив Кулона.

*Калантаров Павел Лазаревич* (1892–1951), профессор Ленинградского политехнического института, электротехник.

*Калашиников Юрий Тимофеевич*, главный конструктор по электроприводу Новокраматорского машиностроительного завода.

*Капп Гизберт* (1852–1922), Англия, физик, вывел формулу трансформаторной ЭДС.

*Касьянов Владимир Тихонович* (1888–1952), завод «Электро-сила», профессор Ленинградского электротехнического института.

*Карлейль А. (Энтони)* (1768–1840), Англия, врач, обнаружил разложение воды электрическим током.

*Кирхгоф Густав Роберт* (1824–1887), Германия, член-корреспондент Петербургской академии наук (1862), физик, обосновал распределение электрической энергии в разветвленных электрических цепях.

*Классон Роберт Эдуардович* (1868–1926), энергетик, принимал участие в монтаже и пуске первой линии трехфазного тока.

*Ключев Владимир Иванович*, профессор Московского энергетического института.

*Ковчин Сергей Александрович*, профессор, заведующий кафедрой систем автоматического управления (1974–1986) Санкт-Петербургского государственного технического университета.

*Козырев Сергей Картерьевич*, профессор, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода Московского энергетического института.

*Козярук Анатолий Евтихиевич*, профессор, заведующий кафедрой электротехники и электромеханики (с 1989 г.) Санкт-Петербургского государственного горного института.

*Коллан Никольс* (1799–1864), Ирландия, физик, изобрел индукционную катушку.

*Константинов Константин Иванович* (1817–1871), ученый в области артиллерии, ракетостроения, приборостроения и автоматики, изобрел электромеханический переключатель – распределитель.

*Копняев Павел Петрович* (1867–1932), электротехник, автор первого русского труда по машинам постоянного тока.

*Копылов Игорь Петрович*, профессор Московского энергетического института.

*Кордаков Валерий Николаевич*, профессор Санкт-Петербургского государственного горного института.

*Костенко Михаил Полиевктович* (1889–1976), академик АН СССР, директор Института электромеханики АН СССР, электромеханик, основатель научной школы электромашиностроения.

*Красин Леонид Борисович* (1870–1926), дипломат, строитель электростанций в Баку, сотрудник фирмы «Сименс и Шуккерт».

*Кржыжановский Глеб Максимилианович* (1872–1959), вице-президент АН СССР (1929–1939), руководитель энергетического института АН СССР, председатель комиссии ГОЭЛРО.

*Кричевский Евгений Самойлович* (1916–1998), профессор Ленинградского горного института.

*Круг Карл Адольфович* (1873–1952), член-корреспондент АН СССР (1953), электротехник, участник составления плана ГОЭЛРО.

*Кулон Шарль Огюстен* (1736–1806), Франция, физик и инженер, один из основоположников электростатики.

*Курбатов Сергей Иванович* (1885–1934), профессор Московского высшего технического училища им. Баумана, электромеханик, специалист по электрической тяге и машинам постоянного тока.

*Лангмюр Ирвинг* (1881–1957), США, физик, предложил газонаполненную лампу накаливания.

*Лаплас Пьер Симон* (1749–1827), Франция, почетный член Петербургской академии наук (1802), астроном, математик, физик, автор классических трудов по теории вероятностей и небесной механике.

*Лацинский Александр Александрович* (1878–1929?), заведующий кафедрой электротехники, профессор Ленинградского горного института.

*Лачинов Дмитрий Александрович* (1842–1902), физик, электротехник, занимался передачей электроэнергии на большие расстояния без больших потерь за счет повышения напряжения.

*Лебедев Алексей Борисович* (1883–1941), профессор Ленинградского политехнического института, специалист в области электрической тяги.

*Лебединский Владимир Константинович* (1868–1937), профессор Ленинградского государственного университета, радиотехник, пионер практической радиотехники.

*Ленц Эмилий Христианович* (1804–1865), академик Петербургской академии наук (1830), ректор Петербургского университета (с 1863), физик, электротехник, создал методы расчета электромагнитов, открыл обратимость электрических машин, экспериментально обосновал закон Джоуля–Ленца.

*Лодж Оливер* (1851–1940), Англия, инженер-электрик, предложил механизм для встряхивания когерера.

*Лодыгин Александр Николаевич* (1847–1923), электротехник, создатель угольной лампы накаливания, один из основателей электротермии.

*Ломоносов Михаил Васильевич* (1711–1765), естествоиспытатель, поэт, основоположник физической химии.

*Лоренц Хендрик Антон* (1853–1928), Нидерланды, профессор, физик, основоположник электронной теории.

*Лосев Олег Владимирович* (1903–1942), физик, положил начало применению кристаллических детекторов в России.

*Лютер Роберт Андреевич* (1889–1976), доктор технических наук, шеф-электрик завода «Электросила».

*Майзель Леонид Исаакович* (1882–1955), руководитель отдела светотехники Всесоюзного электротехнического института.

*Максвелл Джеймс Клерк* (1831–1879), Англия, физик, создал теорию электромагнитного поля, развил идеи М.Фарадея, предсказал существование электромагнитных волн.

*Максим Хайрем Стивенс* (1840–1916), США, создатель пушки, пулемета.

*Максимов Александр Евгеньевич* (1902–1990), профессор Ленинградского горного института.

*Маркони Гульельмо* (1874–1937), Италия, физик, радиотехник, создатель беспроводного телеграфа.

*Мартынов Михаил Владимирович*, профессор Московского государственного горного университета.

*Маскар Элетер Эли Никола* (1837–1908), Франция, физик, президент Парижской академии наук (1904), член-корреспондент Петербургской академии наук (1891), исследовал передачу электрической энергии.

*Мейсснер Э. (Александр)* (1883–1958), Австрия, Германия, электротехник, использовал триод в качестве лампового генератора.

*Мие (Ми) Густав* (1868–1957), Германия, физик, исследовал процессы коммутации (1899).

*Миткевич Владимир Федорович* (1872–1951), академик АН СССР (1929), электротехник, занимался проблемами передачи электромагнитной энергии, участник составления плана ГОЭЛРО.

*Мордей Вильям Моррис* (1856–1938), Англия, предложил уравнивательные соединения в генераторах (1883).

*Морзе Сэмюэль Финли Бриз* (1791–1872), США, художник и изобретатель, изобрел электромагнитный телеграфный аппарат (1837) и телеграфный код (1838).

*Морозов Дмитрий Петрович* (1900–1963), профессор, заведующий кафедрой электрооборудования Московского энергетического института, автор учебника по электроприводу.

*Мушенбрук Питер ван* (1692–1761), Нидерланды, почетный член Петербургской академии наук (1754), физик, медик, создатель лейденской банки, автор первого систематического курса физики (1739).

*Нейман Леонид Робертович* (1902–1975), академик АН СССР (1970), профессор Ленинградского политехнического института, основоположник трудов по распространению электромагнитных волн в нелинейной среде.

*Нейман Франц Эрнест* (1798–1895), Германия, физик, составил уравнения цепей в дифференциальной форме, автор первого математического выражения электромагнитной индукции.

*Негоро (Негро) Сальватор, дель* (1768–1839), Италия, создал генератор переменного тока с возвратно-поступательным движением (1832).

*Никольсон Уильям* (1753–1815), Англия, физик, химик и инженер, обнаружил разложение воды электрическим током (1800).

*Новиков Владислав Александрович*, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.

*Нолле Жан Антуан* (1700–1770), Франция, физик, создал многомашинный агрегат для питания дуговых ламп.

*Онищенко Георгий Борисович*, профессор Московского открытого университета.

*Ом Георг Симон* (1787–1854), Германия, электротехник, установил основной закон электрической цепи.

*Паррот Георг Фридрих (Егор Иванович)* (1767–1852), Германия, первый ректор Дерптского университета (1802), работал в России, почетный член Петербургской академии наук (1840), основатель теории гальванических элементов.

*Патон Евгений Оскарович* (1870–1953), специалист в области сварки и мостостроения, в 1953 г. под его руководством в Киеве был построен цельно сваренный мост.

*Пачинотти Антонио* (1841–1912), Италия, физик, создал магнитоэлектрическую машину с кольцевым зубчатым якорем, обосновал обратимость электрических машин.

*Пейдж Чарльз Г.* (1812–1868), США, врач, изобрел индукционную катушку (1838).

*Пелтье Жан Шарль Атаназ* (1785–1845), Франция, физик, метеоролог, часовщик, открыл термоэлектричество (1834).

*Петров Василий Владимирович* (1761–1834), физик, электротехник, основоположник теории горения.

*Петров Георгий Николаевич* (1899–1977), член-корреспондент АН СССР (1964), специалист в области электрических машин.

*Пикси Ипполит* (1808–1835), Франция, изобретатель, построил генератор постоянного тока с коммутатором (1832).

*Пиотровский Людвик Марианович* (1886–1959), специалист в области электрических машин, профессор Ленинградского политехнического института.

*Пироцкий Федор Анполонович* (1845–1898), изобретатель-электротехник

*Писаревский Василий Григорьевич* (1821–1895), первый директор Ленинградского электротехнического института.

*Планте Гастон Раймонд* (1834–1889), Франция, изобрел свинцовый аккумулятор (1839).

*Плащанский Леонид Александрович*, профессор Московского государственного горного университета.

*Пойнтинг Джон Генри* (1852–1914), Англия, физик, ввел понятие электромагнитной энергии, его именем назван вектор плотности потока электромагнитной энергии.

*Поливанов Михаил Константинович* (1875–1927), профессор Московского высшего технического училища им. Баумана, создатель московского трамвая.

*Попов Александр Степанович* (1859–1905), физик, электротехник, один из пионеров применения электромагнитных волн в практических целях, изобретатель радио.

*Попов Владимир Константинович* (1895–1948), профессор Ленинградского политехнического института.

*Проскуряков Руслан Максимович*, профессор, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов Санкт-Петербургского государственного горного института.

*Пугачев Емельян Васильевич*, профессор, заведующий кафедрой горной электромеханики Сибирской государственной горно-металлургической академии.

*Разгильдеев Геннадий Иннокентьевич*, профессор Кемеровского государственного технического университета.

*Рассудов Лев Николаевич*, профессор, заведующий кафедрой робототехники и автоматизированных производственных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.



*Рейс Иоганн Филипп* (1834–1874), Германия, физик, изобрел телефон.

*Рейс Федор Федорович* (1778–1852), физик, обнаружил явление электроосмоса (1807).

*Риги Аугусто* (1850–1921), Италия, физик, член ряда академий, в том числе Петербургской, обнаружил явление гистерезиса при намагничивании (1807).

*Ринкевич Сергей Александрович* (1886–1955), профессор Ленинградского электротехнического института, специалист в области электрического распределения механической энергии.

*Риттер Иоганн Вильгельм* (1776–1810), Германия, физик и химик, обнаружил разложение воды током (1880).

*Рихман Георг Вильгельм* (1711–1753), русский физик, изобрел электрометр и калориметр, изучал атмосферное электричество.

*Рихтер Рудольф* (1877–1957), профессор Высшей технической школы в Карлсруэ, автор многотомной монографии по электрическим машинам.

*Риччи Уильям* (1790–1837), Англия, изобрел двигатель с ртутным коммутатором (1833).

*Романьози Джованни Доменико* (1761–1835), Италия, философ и юрист, профессор гражданского права, обнаружил влияние проводника с током на магнитную стрелку (1802).

*Роуланд Генри Август* (1848–1901), США, член Лондонского королевского общества (1889) и Парижской академии наук (1893), сформулировал законы магнитных цепей (1873).

*Рудаков Виктор Васильевич* (1918–1997), профессор, заведующий кафедрой электрических машин и автоматизированного привода (1969–1997) Санкт-Петербургского государственного горного института.

*Румкорф Генрих Даниэль* (1803–1877), Германия, изобретатель, конструктор точных инструментов в Париже, изобрел индукционную катушку.

*Рысьев Анатолий Васильевич* (1908–1986), профессор Ленинградского горного института.

*Сабинин Юрий Алексеевич*, профессор, заместитель директора по научной работе Института электромеханики (1952–1970), заведующий кафедрой автоматики и телемеханики (1970–1995) Санкт-Петербургского государственного института точной механики и оптики.

*Савар Феликс* (1791–1841), Франция, военный хирург, физик, сформулировал закон о напряженности магнитного поля, создаваемого током.

*Сандлер Абрам Соломонович*, профессор Московского энергетического института.

*Сван (Свон) Джон Уильсон* (1828–1914), Англия, конструктор осветительных ламп.

*Семенов Игорь Михайлович*, профессор, заведующий кафедрой систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного технического университета.

*Сименс Вернер Эрнст, фон* (1816–1892), основатель электротехнических концернов «Сименс и Гальске», «Сименс и Шукерт», занимавшихся проблемами создания телеграфных установок, освещения, трамвая.

*Славянов Николай Гаврилович* (1854–1897), один из создателей дуговой электросварки, впервые применил для сварки электрический генератор.

*Слежановский Ольгерд Владиславович*, профессор, зам. директора ВНИИЭлектропривод, зам. главного редактора журнала «Электротехника».

*Смирнов Александр Иванович* (1851–1911), редактор журнала «Электричество», строитель электростанций Гатчинского и Зимнего дворцов, Мариинского театра.

*Смулов Александр Антонович* (1884–1937), ректор Ленинградского электротехнического института, электротехник, один из участников составления и реализации плана ГОЭЛРО, специалист в области техники высоких напряжений, занимался проблемами передачи электрической энергии.

*Соколовский Георгий Георгиевич*, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.

*Стерджен Вильям* (1783–1850), Англия, заведующий Галереей практических знаний в Манчестере, изобрел электромагнит (1825), сконструировал гальванометр с подвижной катушкой.

*Столетов Александр Григорьевич* (1839–1896), физик, создатель электромагнитной теории света.

*Страхов Петр Иванович* (1736–1827), физик, установил, что вода является проводником.

*Сыромятников Иван Аркадьевич*, профессор Московского энергетического института.

*Терехов Владимир Михайлович*, профессор Московского энергетического института.

*Тесла Никола* (1856–1943), Сербия, США (с 1884 г.), физик, открыл явление вращающегося магнитного поля, предложил использовать многофазные электрические машины.

*Тиме Иван Августович* (1838–1920), профессор Петербургского горного института.

*Тихомиров Василий Александрович* (1849–1899), электромеханик.

*Толвинский Вацлав Александрович* (1887–1952), профессор, заведующий кафедрой электрических машин (с 1918 г.) Ленинградского политехнического института, физик, электротехник.

*Томсон Илайю* (1854–1937), изобретатель репульсионного двигателя.

*Томсон Уильям барон Кельвин* (1824–1907), Англия, физик, сформулировал второе начало термодинамики, предложил ввести абсолютную шкалу температур.

*Тулин Владимир Семенович*, профессор Московского государственного горного университета.

*Тюри Рене Фонтен*, Швейцария, внес значительный вклад в развитие техники передачи электроэнергии постоянным током, первая установка по системе Тюри осуществлена в Генуе (1889-1993).

*Уатсон Уильям*, (1715–1787), Англия, врач, член Королевского общества, хранитель Британского музея, создал теорию конденсаторов, построил громоотвод (1762).

*Уатт Джеймс* (1736–1819), Англия, изобретатель теплового двигателя.

*Уитстон Чарльз* (1802–1875), Англия, физик, электротехник, исследовал самовозбуждение генераторов, создал мостик Уитстона.

*Ульянин Всеволод Александрович* (1863–1931), профессор Казанского университета, исследовал ЭДС селенового элемента (1888).

*Умов Николай Александрович* (1846–1915), физик, автор работы «Уравнение движения энергии в телах» (1874), его именем назван вектор Умова – Пойнтинга.

*Усагин Иван Филиппович* (1855–1919), предложил замкнутую магнитную систему трансформаторов.

*Фарадей Майкл* (1791–1867), Англия, почетный член Петербургской академии наук (1830), физик, основоположник учения об электромагнетизме, открыл электромагнитную индукцию (1831).

*Ферранти Себастьян Циани* (1864–1930), Англия, электротехник, участвовал в создании электростанции переменного тока (1886).

*Феррарис Галилео* (1847–1897), Италия, занимался исследованием трансформаторов, предложил двухфазный асинхронный двигатель.

*Флеминг Джон Амброуз* (1849–1945), Англия, радиотехник, разработал конструкцию двухэлектродной лампы (1904).

*Форест Ли, де* (1873–1961), США, радиоинженер, руководил фирмами «Американская компания беспроволочного телеграфа де Фореста» и «Де Форест радиотелефон компани», изобрел трехэлектродную вакуумную лампу (1907).

*Франклин Бенджамен* (1706–1790), США, физик, государственный деятель, работал в области теории конденсаторов, исследовал атмосферное электричество, изобрел молниеотвод.

*Фрейлих (Фрелих) Герберт* (1905–?), Англия, физик-теоретик, член Лондонского королевского общества, профессор Ливерпульского университета.

*Фроман Поль Густав* (1815–1865), Франция, электротехник, создал электродвигатель Фромана (1880).

*Фуко Жан Бернар Леон* (1819–1868), Франция, член-корреспондент Петербургской академии наук (1860), физик, осуществил опыт с маятником, определил скорость света в воде и в воздухе, обнаружил электрические вихревые токи, которые в его честь названы токами Фуко.

*Хазельвандер Фридрих Август* (1859–1932), Германия, инженер, предложил трехфазную систему с тремя проводами.

*Хвольсон Орест Данилович* (1879–1934), профессор Ленинградского университета, физик, автор трудов по электричеству и магнетизму.

*Хевисайд Оливер* (1850–1925), Англия, физик, основоположник операторного метода, независимо от Г.Герца записал уравнения Максвелла в современном виде, создал теорию передачи сигналов на дальние расстояния.

*Хиорт Серен* (1801–1870), Дания, электротехник, исследовал самовозбуждение генераторов постоянного тока.

*Холмс Фредерик Хейль* (1850-е гг), Англия, электротехник, предложил использовать мощные генераторы в виде многомашинного агрегата.

*Холуянов Федор Иванович* (1879–1936), заведующий кафедрой электрических машин Ленинградского электротехнического института.

*Циперновский Карой* (1853–1942), Венгрия, электротехник, занимался теорией и конструкцией трехфазного трансформатора, совместно с М.Дери разработал систему распределения однофазного переменного тока.

*Чиколев Владимир Николаевич* (1845–1898), электротехник, заложил основы теории прожекторного освещения.

*Чиликин Михаил Григорьевич*, профессор, ректор Московского энергетического института, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода (1952–1977).

*Чураев Анатолий Степанович* (1890–1942), профессор, заведующий кафедрой электротехники (1929–1941) Ленинградского горного института.

*Шапирер Петр Иванович* (1874–1937), преподаватель Ленинградского горного института, горный инженер, руководитель проектного бюро.

*Шателен Михаил Андреевич* (1866–1957), академик АН СССР, электротехник, один из создателей плана ГОЭЛРО, автор трудов по электротехнике и истории техники.

*Швейггер Иоганн Х.* (1779–1857), Германия, Австрия, изобрел прибор электромагнитной системы–индикатор тока (1820).

*Шенфер Клавдий Ипполитович* (1885–1946), академик АН СССР (1932), профессор Московского высшего технического училища, профессор Московского энергетического института

*Шиллинг Павел Львович* (1768–1837), офицер, дипломат, востоковед, изобрел мину, электромагнитный телеграф, электрический кабель.

*Шклярский Лех Феликсович* (1917–1994), профессор кафедры инженерного менеджмента Московского высшего технического училища им. Баумана.

*Шклярский Людгер Феликсович*, академик Польской академии наук.

*Шклярский Феликс Николаевич* (1883–1955), профессор, заведующий кафедрой горной электротехники (1941–1947) Ленинградского горного института.

*Школьников Александр Дмитриевич*, профессор Санкт-Петербургского государственного горного института.

*Шпаковский Александр Ильич* (1823–1881), сконструировал дуговую лампу с автоматическим регулятором.

*Штейнмец Чарльз Протеус* (1865–1923), Германия, США, главный инженер проектов в фирме «Дженерал Электрик», автор фундаментального курса ТОЭ.

*Щенснович Александр Николаевич*, инженер-технолог, применил для питания Новороссийского элеватора трехфазный ток (1893).

*Щуцкий Виталий Иванович*, профессор Московского государственного горного технического университета.

*Эдисон Томас Алва* (1847–1931), США, почетный член-корреспондент АН СССР (1930), изобретатель и предприниматель, усовершенствовал телеграф, телефон и лампу накаливания (1879), построил первую в мире общественную электростанцию (1882).

*Эльстер Юлиус* (1854–1920), Германия, физик, доктор философии, предложил использовать в вакуумных приборах катоды из щелочных металлов (1910).

*Эпинус Франц Ульрих Теодор* (1724–1802), Германия, Россия (с 1757), академик Петербургской академии наук (1756–1798), физик, исследовал пирозлектричество, сделал попытку математической трактовки электрических и магнитных явлений (1759).

*Эрстед Ганс Христиан* (1777–1851), Дания, почетный член Петербургской академии наук (1830), физик, основоположник электродинамики, установил связь между электричеством и магнетизмом.

*Юз Дэвид Эдуард* (1831–1900), Англия, профессор музыки, физик, изобрел буквопечатающий телеграф и угольный микрофон (1855).

*Юнг Томас* (1773–1829), Англия, физик, врач, астроном, ввел понятие энергии для кинетической энергии.

*Юньков Михаил Григорьевич*, доктор технических наук, ученый секретарь ВНИИЭлектропривода, профессор Московского энергетического института.

*Яблочков Павел Николаевич* (1847–1894), электротехник, изобретатель в области электрического освещения и электрических машин.

*Якоби Борис Семенович (Морис Герман)* (1801–1874), академик Петербургской академии наук (1842), физик, электротехник, изобрел электродвигатель (1834), создал гальванотехнику (1838) и несколько типов телеграфных аппаратов.

## РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Белькинд Л.Д.* Карл Адольфович Круг. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956.
- Белькинд Л.Д.* Павел Николаевич Яблочков. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
- Веселовский О.Н.* Доливо-Добровольский. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
- Веселовский О.Н.* Энергетическая техника и ее развитие / О.Н.Веселовский, Я.А.Шнейберг. М.: Высшая школа, 1976.
- Веселовский О.Н.* Очерки по истории электротехники / О.Н.Веселовский, Я.А.Шнейберг. М.: Изд-во Московского энергетического института, 1993.
- Горный журнал. 1998. № 10.
- Давыдова Л.Г.* Александр Антонович Смуров. М.-Л.: Наука, 1974.
- Дубрава Т.С.* Ленинградский горный институт / ЛГИ. Л., 1955.
- Елисеев А.А.* Возникновение науки об электричестве в России. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960.
- Известия вузов. Горный журнал, 1973. № 2.
- История создания и развития Санкт-Петербургского государственного горного института. Т.1. / В.Г.Афанасев, А.Т.Кравцова, Л.Г.Ложкина и др. СПб.: Изд-во Медиа-Маркет, 1999.
- История энергетической техники СССР // Под ред. Л.Д.Белькинда. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957.
- Ленинградский горный институт 1773-1973. М.: Высшая школа, 1973.
- Огиевецкий А.С.* Николай Гаврилович Славянов / А.С.Огиевецкий, Л.Д.Радунский. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1952.
- Очерки развития физики в России / Под ред. проф. А.К.Тимирязева. М.: Государственное учебно-методическое издательство Министерства просвещения РСФСР, 1949.
- Пиотровский Л.М.* Электрические машины. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1949.
- Симоненко О.Д.* Электротехнические науки в первой половине XX века. М.: Наука, 1988.
- Толвинский В.А.* Электрические машины постоянного тока. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956.
- Файнбойм И.Б.* Иван Гаврилович Александров. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955.
- Цверава Г.К.* Никола Тесла. Л.: Наука, 1974.
- Чеканов А.А.* Михаил Андреевич Шателен / А.А.Чеканов, Б.Н.Ржонсницкий. М.: Наука, 1972.
- Шателен М.А.* Русские электротехники XIX века. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955.
- Шателен М.А.* Преподавание электротехники в высших технических учебных заведениях в России и за рубежом. Горный Институт Императрицы Екатерины II // Электричество. 1898. № 11-12.
- Яроцкий А.В.* Павел Львович Шиллинг. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1953.
- Яроцкий А.В.* Борис Семенович Якоби. М.: Наука, 1988.



## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	5
Развитие электрофизики и электротехники в мире и в России до второй половины XIX века.....	9
Развитие электротехники во второй половине XIX века .....	26
Развитие теории и практики в области электромеханических преобразований и электрического распределения механической энергии.....	39
Развитие систем передачи электроэнергии и начало применения переменного тока.....	42
Развитие систем производства и передачи электроэнергии в России.....	54
Развитие технической базы электрификации России.....	59
Развитие электротехнической науки и подготовка специальных кадров .....	62
Развитие теории и практики электрического привода .....	65
Работы ученых Санкт-Петербургского горного института в деле развития электрификации горной промышленности и подготовки кадров .....	73
Именной указатель по электротехнике.....	82
Рекомендательный библиографический список .....	103

СОЛОВЬЕВ Александр Сергеевич  
КОЗЯРУК Анатолий Евтихиевич

### ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ В РОССИИ

*Учебное пособие*

Редактор *Е.С.Дрибинская*

Лицензия ЛР № 020355 от 30.12.96

Сдано в набор 21.11.2000. Подписано к печати 19.12.2000. Формат 60х84/16.  
Бум. для копировальной техники. Отпечатано на ризографе. Усл.печ. л. 6.  
Усл.кр.-отт. 6. Уч.-изд. л. 4,77. Тираж 400 экз. Заказ 768. С 218.

Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В.Плеханова  
РГПУ Санкт-Петербургского государственного горного института  
Адрес института и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2