Минобрнауки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

**«Оренбургский государственный университет»**

Кафедра электро- и теплоэнергетики

Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

*«Б.1.В.ДВ.6.2 История электротехники»*

Уровень высшего образования

БАКАЛАВРИАТ

Направление подготовки

*13.03.02 Электроэнергетика и электротехника*

(код и наименование направления подготовки)

*Электроснабжение*

(наименование направленности (профиля) образовательной программы)

Тип образовательной программы

*Программа академического бакалавриата*

Квалификация

*Бакалавр*

Форма обучения

*Заочная*

Год набора 2015

Составители\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Чернова А.Д.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Валиуллин К.Р.

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании кафедры электро- и теплоэнергетики

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Митрофанов С.В.

Методические указания является приложением к рабочей программе по дисциплине История электротехники, зарегистрированной в ЦИТ под учетным номером

|  |
| --- |
|  |
|  |

**Содержание**

|  |  |
| --- | --- |
| 1 Методические указания по практическим занятиям | 4 |
| 2 Методические указания по самостоятельной работе | 103 |
| 2.1 Методические указания по подготовке к самостоятельным занятиям | 103 |
| 2.2 Методические указания по выполнению контрольной работы | 104 |
| 3 Методические указания по промежуточной аттестации по дисциплине | 104 |

**1 Методические указания по практическим занятиям**

Целью практических занятий является получение и закрепление знаний в процессе самостоятельного изучения учебного материала, а также формирование у них умений и навыков, определённых в соответствии с компетенциями рабочей программы учебной дисциплины.

В ходе подготовки к практическому занятию необходимо изучить основную литературу, ознакомиться с дополнительной литературой, выполнить выданные преподавателем практические задания.

В рамках образовательного процесса по дисциплине «История электротехники» используются следующие технологии проведения практических занятий: решение учебных задач, решение тестовых заданий, обсуждение конкретных ситуаций.

| Тема | Источник |
| --- | --- |
| Наблюдение электрических и магнитных явлений, начало экспериментальных исследований, формирований первых теорий. Первый источник электрического тока, открытие электрической дуги, открытие основных свойств и законов электрического тока, явления электромагнитной индукции. Создание первых электрических машин и источников освещения, измерительных приборов. | Горин, Ю.В. Концепции современного естествознания. §2.4-2.5, С 91-115 |
| Основные признаки появления электрификации. Переменный ток и трехфазные системы электроснабжения Первые электростанции, трансформаторы и линии электропередач. Основные этапы развития электроэнергетики России. Развитие электрооборудования. | Ушаков, В.Я. Современные проблемы электроэнергетики . §1.1, С18-28 |
| Назначение распределительных сетей, конструкция и принцип построения. Развитие электрических сетей, ЛЭП разных напряжений, передач постоянного тока. | Ушаков, В.Я. Современные проблемы электроэнергетики . §11.2 – §11.6, С 255-284 |
| Ограничение потерь и показатели качества электроэнергии. | Ушаков, В.Я. Современные проблемы электроэнергетики . §11.1, С 245-255 |
| Исследования в области причин и последствий грозовых и коммутационных перенапряжений, | Бочаров, Ю.Н. Техника высоких напряжений  §1-2, С 5-100 |
| Исследования в области причин и последствий перегрузок и коротких замыканий. Развитие техники релейной защиты и автоматики. Зарождение и развитие промышленной электроники. Автоматизированные системы управления энергетическими и производственными процессами. | Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения  §В.3 С 14-17; §В.6 С 28-33  §В.7 С 33-41; §10 С 339-389  § 5-9 С 205-339 |
| Альтернативные и возобновляемые источники электроэнергии. Сверхпроводимость. | Ушаков, В.Я. Современные проблемы электроэнергетики . §10, 220-244 |

**Занятие 1. Введение. Предмет истории электротехники. Цели и задачи дисциплины. Основные этапы развития электротехники**

Знание истории развития науки и техники, важнейшего направления деятельности любого государства, позволяет правильно оценить существующую обстановку в электроэнергетической отрасли, учесть опыт предшествующих поколений и развить отрасль с учетом этих фактов.

Развитие электроэнергетики есть мощная сила, которая влияет на жизненный уровень людей, изменяет характер общества, является причиной социальных перемен и направляет общественное развитие.

Слово «электричество» воспринимается в максимально широком смысле как обширнейшая область теоретического знания и практического применения, включающая свойства, действия, проявления, получение, преобразование, передачу, распределение и, наконец, использование электричества как материала и энергии во всех видах. Хотя рождение слова «электричество» относят к эпохе Античности, лишь в XIX в. была сформирована (1800–1830) электрическая наука и создана (к 1880-м гг.) электрическая техника. Первая превратилась в теоретические основы электротехники (ТОЭ), вторая – в электротехнику как отрасль промышленности и сферу деятельности, в частности в направление высшего образования.

Электротехника начиналась с изобретений и экспериментов. Изобретение А. Вольтом гальванического элемента (1799) и исследования (1800) накаливания проводников током позволили предсказать появление электроосвещения и электротермии, изучать электролиз, гальваностегию и гальванопластику, открыть электрическую дугу (В. В. Петров, 1802) и начать ее применение для освещения, сварки, пайки. Введение А. Ампером (1820) понятия о направлении тока, наряду с исследованиями Ж. Био и Ф. Савара (1820) по взаимодействию тока и магнитного поля, установление закона Ома (1827) и законов Кирхгофа (1845), работы М. Фарадея по вращению проводника с током (1821) и электромагнитной индукции (1831), исследование Э. Х. Ленцем обратимости электрических машин (1833) привели к созданию сначала прообраза генератора (Фарадей, 1831), затем к изготовлению И. Пикси (по заказу А. Ампера) электромагнитного генератора постоянного и переменного тока (1832), Б. С. Якоби – электродвигателя с непосредственным вращением якоря (1834), Дж. Вулричем – генераторов для питания гальванической ванны (1842). Самовозбуждение машин, открытое В. Сименсом (1866) наряду с Г. Уайлдом (1863), открытие явления вращающегося магнитного поля, создание системы двухфазного тока (Г. Феррарис, 1885) и ее развитие (Н. Тесла, 1886), изобретение П. Н. Яблочковым (1876) и И. Ф. Усагиным (1882) трансформатора, М. О. Доливо-Добровольским асинхронного двигателя с «беличьей клеткой» (1882) и трехфазного трансформатора с параллельными стержнями (1891), изолирование провода шелком (Дж. Генри, 1827), применение бесшовной резиновой изоляции проводов и кабелей (В. Сименс, 1847) и кабеля со свинцовой оболочкой (Ф. Борель, 1879) определили практическую значимость электрических исследований.

Таким образом, открытия в физике и поиски технических решений уже к концу XIX в. превратили электротехнику во вполне значимую науку и технику. Завершение формирования основ электротехники отразилось в установлении наименования электрических единиц (CGS – 1881, SI – 1960), характеристик переменного тока (1889), системы символов и обозначений (1893) и, наконец, в образовании (1904) Международной электротехнической комиссии – МЭК. (Электротехнический отдел Русского технического общества был организован в 1880 г. Тогда же начал выходить журнал «Электричество».) С точки зрения мировой истории, именно развитие электротехники и ее экспансия во все отрасли техники, а затем и быта привели к развитию электроэнергетики, которая сформировалась в 1870–1930 гг. (до этого считалось технико-экономически бесперспективным создание и электродвигателя, и электрического генератора). В 1924 г. был образован Мировой энергетический комитет (МИРЭК), призванный решать проблемы большой энергетики. Выделяют следующие основные этапы ее становления. З. Т. Грамм (1873) изготовил локомобильноэлектрогенераторную установку для электроснабжения предприятия. Г. Уайлд исследовал синхронизацию двух генераторов переменного тока (1868). Ф. А. Пироцкий исследовал передачу электричества, а Д. А. Лачинов теоретически обосновал вопрос о передаче большого количества электричества на большое расстояние. На первом Всемирном конгрессе электриков (1881) с докладом «О передаче и распределении электрических токов» выступил М. Депре, который позднее (1882) построил первую линию передачи постоянного тока высокого напряжения (2,4 кВ, 57 км). М. О. Доливо-Добровольский соорудил (1891) трехфазную ЛЭП с междуфазным напряжением 13760–15200 В для передачи 200 кВт (генератор 210 кВ·А, 86–95 В, повышающий трансформатор 150 кВ·А) на 175 км. Дж. Лейн-Фокс (1880) изобрел первые счетчики электроэнергии. В Англии были введены первые правила устройства электроустановок (1882). Г. Феррарис (1884) ввел понятие коэффициента мощности, Э. Томсон (1886) применил защитное заземление, А. Э. Кеннели (1889) получил зависимость между сечением проводника и длительно допустимым током нагрузки. П. Бушеро установил (1898) конденсаторы для компенсации реактивной мощности. В. Петерсен предложил (1917) систему компенсации емкостных токов замыкания на землю. Область устойчивости параллельной работы энергосистем (в 1920-х гг.) основополагающими теоретическими работами определил А. А. Горев. В. М. Монтсингер (1930) сформулировал основные закономерности между температурой обмотки, нагрузкой и сроком службы силовых трансформаторов. И. А. Сыромятников внедрил (1937) самозапуск электродвигателей при кратковременном перерыве питания.

Предпосылкой бурного развития электрификации послужило создание М. О. Доливо-Добровольским трехфазных синхронных генераторов, асинхронных двигателей и трансформаторов. Убедительной демонстрацией преимуществ трехфазных цепей была знаменитая Лауфен-Франкфуртская электропередача (1891), сооруженная при активном участии М. О. ДоливоДобровольского. С этого времени строятся мощные электростанции, возрастает напряжение электропередач, разрабатываются новые конструкции электрических машин, аппаратов и приборов. Электродвигатель занимает господствующее положение в системе промышленного электропривода. В начале ХХ в. процесс электрификации постепенно охватывает новые области народного хозяйства: развиваются электротехнология, электротранспорт и др. Сегодня электрическая энергия широко используется в самых разнообразных отраслях промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и в быту. Широкое применение переменного тока потребовало теоретического осмысливания и математического описания физических процессов, происходящих в электрических машинах, линиях электропередачи, трансформаторах и других электротехнических устройствах. Рост потребности в постоянном токе (электротранспорт и др.) вызывает необходимость в развитии преобразовательной техники и промышленной электроники. Электротехника становится базой для разработки автоматизированных систем управления энергетическими и производственными процессами.

**Занятие 2. Наблюдение электрических и магнитных явлений, начало экспериментальных исследований, формирований первых теорий**

Электрические и магнитные явления наблюдались еще в глубокой древности. История светотехники насчитывает немногим более полутора столетий. Её начало относят к моменту создания первого электрохимического генератора в 1800 г. До этого были сделаны только первые шаги по созданию простейших электростатических машин и приборов и установлению некоторых закономерностей в области статического электричества и магнетизма.

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

Второй этап развития электротехники (1831–1870) начался с открытия электромагнитной индукции, а завершился созданием первого промышленного электрического генератора.

Третий этап (1870–1891) ознаменовался внедрением в промышленность электромашинного генератора постоянного тока и завершением исследований в области многофазных систем. Это период интенсивного развития электротехники в условиях децентрализованного производства электроэнергии и начального развития электростанций. В это время начинается становление электротехники как самостоятельной отрасли.

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

Остановимся кратко на важнейших открытиях, способствовавших становлению электростатики. Первые наблюдения электрических и магнитных явлений относятся к VI–VII вв. до нашей эры. В течение многих веков представления о сущности этих явлений были весьма примитивными. Несмотря на это, магнит нашел практическое применение еще до нашей эры в странах древнейших культур – Китае и Индии. Первое научное сочинение в этой области принадлежит У. Гильберту, опубликовавшему в 1600 г. научную работу «О магните, магнитных телах и о большом магните – Земле». Гильберт ввел в науку термин «электричество», назвав «электрическими» тела, способные электризоваться. Дальнейшее изучение электрических явлений привело к созданию разнообразных электрических машин и приборов. Были разработаны первая электростатическая машина (1650), лейденская банка (конденсатор) (1745), электроизмерительный прибор Ломоносова (получив одноименный заряд, витки пружины стремятся оттолкнуться, увлекая за собой пластинку с закрепленным на ней стержнем; степень опускания стержня фиксировалась с помощью «усов»), электрический указатель Г. В. Рихмана (первый прибор непосредственной оценки) и крутильные весы Ш. О. Кулона (один из наиболее точных приборов своего времени, позволивший Кулону в 1785 г. установить закон взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов).

Создание первых электроизмерительных приборов положило начало установлению количественных закономерностей в области электромагнитных явлений. Большое значение имели работы, выявившие электрическую природу грозовых явлений в атмосфере, а также разработка теорий электричества (М. В. Ломоносов, Б. Франклин) и создание разнообразных молниеотводов (М. В. Ломоносов, Б. Франклин, П. Дивиш). Для практики наиболее удачными оказались опыты по использованию электричества в медицинских целях. В многочисленных трудах конца XVIII – начала XIX в. описывались разнообразные электростатические машины и приборы, предназначенные для электролечения. Эти работы немало способствовали расширению знаний в области электричества, установлению влияния электрических разрядов на организм животных и человека, выявлению электроизоляционных свойств стекла, сургуча, смолы, хлопчатобумажных тканей, шелка. Представляют большой интерес труды русского ученого А. Т. Болотова. Им была создана своеобразная электролечебница, в которой устанавливались простые и «особливо маленькие, складные дорожки» электростатические машины, производившие, однако, «изрядное действие». Свой опыт он обобщил в книге «Краткие и на опытности основанные замечания об электрицизме и способности электрических махин к помоганию от разных болезней», изданной в Петербурге в 1803 г.

В течение многих столетий вплоть до последней четверти XVIII в. ученым были известны только явления статического электричества. Промышленный переворот в XVIII в. дал мощный толчок развитию различных отраслей науки, в том числе науки об электричестве. В изучении электрических явлений были достигнуты определенные успехи, ими начинают все более интересоваться не только физики, но и естествоиспытатели, в особенности врачи, пытавшиеся применять электричество для лечебных целей. Отдельные ученые высказывали предположения, что если «вся природа электрическая», то и в организмах человека и животных по жилам и мускулам должна протекать эта таинственная материя. Одним из подтверждений указанных воззрений были электрические рыбы, известные еще с древних времен. Так возникло представление о новом виде электричества, названном «животным». Исследованием мышечных движений лягушек занялся профессор анатомии Болонского университета Луиджи Гальвани (1737–1798). Первые электрофизиологические опыты Л. Гальвани над лягушками относятся к 1770 г. Спустя 11 лет он опубликовал результаты своих исследований в знаменитом «Трактате о силах электричества при мышечном движении», получившем широкую известность.

Во время одного из экспериментов, когда препарированная лягушка лежала на столе, на котором находилась электростатическая машина, Л. Гальвани заметил, что если прикоснуться скальпелем (или любым проводником) к бедренному нерву лягушки в момент, когда из кондуктора машины извлекается искра, то мышцы лягушки судорожно сокращаются. Логично было предположить, что и атмосферное электричество должно действовать аналогично. И действительно, при возникновении молнии мышцы лягушки сокращались. Желая выяснить, какие явления будут наблюдаться при ясной погоде, Л. Гальвани прикрепил медный крючок к железным перилам балкона. Прижимая другой конец крючка к перилам, он снова наблюдал сокращение мышц лягушки. Подозревая, что состояние атмосферы не действует на лягушку, он повторил эксперимент в своей домашней лаборатории: положив препарированную лягушку на металлическую обшивку стола и прижав медный крючок, продетый через спинной мозг лягушки, к столу, он снова увидел сильные сокращения мышц лягушки. Однако после замены одного из металлов непроводником мышечных сокращений у лягушки не происходило. Но сокращения были «энергичнее и продолжительнее», если лягушка лежала не на железном листе, а на серебряной пластине.

Л. Гальвани сделал правильное предположение о том, что сокращение мышц вызывается действием электрических сил, что мышцы и нервы образуют как бы две обкладки лейденской банки. Но нужно было решить очень важный вопрос: как и где во всех этих опытах возникает электричество? Ни железная пластинка, ни медный крючок, соприкасавшиеся с телом лягушки, не могли, по представлениям физиков того времени, служить источником электричества, так как на металлы смотрели только как на проводники, считая, что они могут становиться «электрическими» лишь через прикосновение к наэлектризованным телам; тогда оставалось предположить, что таким источником является сама лягушка. Все это создавало почву для представлений о существовании особого – «животного» – электричества; такую мысль и высказал Л. Гальвани для объяснения наблюдавшихся им фактов. Этому предположению Л. Гальвани придал форму теории, изложенной в упомянутом «Трактате о силах электричества при мышечном движении». Тело животного являлось, согласно взглядам Л. Гальвани, своеобразной лейденской банкой, способной на непрерывное повторное действие. Опыты Л. Гальвани вызвали большой интерес. Среди физиологов стала еще больше, чем ранее, укрепляться мысль об электричестве как удивительном новом средстве для исцеления. Что касается физиков, то их взгляды на явления, наблюдавшиеся Л. Гальвани, разошлись. Одни соглашались с Л. Гальвани и считали, что «гальваническое», или «животное», электричество имеет совершенно иную природу, чем электричество трения; другие отождествляли оба вида электричества; наконец, третья группа физиков вообще оспаривала существование «животного» электричества. К этой группе принадлежал профессор физики Павийского университета (Италия) Алессандро Вольта.

**Занятие 3. Первый источник электрического тока, открытие электрической дуги, открытие основных свойств и законов электрического тока, явления электромагнитной индукции**

В течение нескольких лет (1792–1795) А. Вольта (рис. 2.1) не только повторил все опыты Л. Гальвани, но и произвел ряд новых исследований. И если Л. Гальвани искал причину обнаруженных им явлений как физиолог, то А. Вольта, будучи физиком, искал в них физические процессы. Прежде всего он обратил внимание на факт, уже известный Л. Гальвани, что сокращения мышц наиболее интенсивно происходят при использовании двух разнородных металлов. Продолжая исследования, он отверг идеи Л. Гальвани о «животном» электричестве и пришел к выводу, что источником электричества является контакт двух разнородных металлов: «Металлы не только прекрасные проводники, но и двигатели электричества. ...Лягушка, приготовленная по способу Гальвани, есть чувствительнейший электрометр», – утверждал А. Вольта. Обобщением исследований А. Вольта была предложенная им теория «контактного электричества», суть которой такова: при соприкосновении различных металлов происходит разложение их «естественного» электричества; при этом электричество одного знака собирается на одном металле, а другого – на другом. Силу, возникающую при контакте двух металлов и разлагающую их «естественное» электричество, А. Вольта назвал электровозбудительной, или электродвижущей, силой; эта сила «перемещает электричество так, что получается разность напряжений» (между металлами. – Авт.).

Исследовав этот вопрос при помощи созданного им весьма чувствительного прибора – электроскопа с конденсатором, А. Вольта установил, что металлы можно распределить в некоторый ряд, в котором «разность напряжений» между двумя металлами будет тем больше, чем дальше они расположены один от другого. С современной точки зрения совершенно очевидна ошибочность идеи Вольта о возможности получения электрического тока посредством простого контакта разнородных металлов, т. е. получения электрической энергии без затраты для этого какого-либо другого вида энергии. Однако в начале XIX в. эта теория контактного электричества нашла много сторонников и на некоторое время удержалась в науке. Многочисленные эксперименты привели А. Вольта к выводу, что непрерывный электрический «флюид» может возникнуть лишь в замкнутой цепи, составленной из различных проводников – металлов (которые он называл «проводниками первого класса») и жидкостей (названных им «проводниками второго класса»). Опыты А. Вольта завершились построением в 1799 г. первого источника непрерывного электрического тока, составленного из медных и цинковых кружков (пар), переложенных суконными прокладками, смоченными водой или кислотой.

Этот прибор, о котором он впервые сообщил президенту Лондонского королевского общества в марте 1800 г., был назван им «электродвижущим аппаратом», а позже французы стали его называть «гальваническим или вольтовым столбом». Необходимость применения проводников второго класса (суконных кружков, смоченных водой или кислотой) А. Вольта объяснял следующим: при соприкосновении двух различных металлов электричество одного знака сосредоточивается на одном металле, а электричество противоположного знака – на другом. Если составить столб из нескольких пар различных металлов, например цинка и серебра (без прокладок), то каждая цинковая пластина будет находиться в соприкосновении с одинаковыми серебряными пластинами и их общее действие будет взаимно уничтожаться. Для того чтобы действие отдельных пар суммировалось, необходимо обеспечить соприкосновение каждой цинковой пластинки только с одной серебряной. Это осуществляется с помощью проводников второго рода – суконных кружков, смоченных водой или кислотой, разделяющих пары металлов и не препятствующих движению электричества. Таким образом, А. Вольта, не понимая того, что электрический ток возникает в результате химических процессов между металлами и жидкостями, практически пришел к созданию гальванического элемента, действие которого основывалось именно на превращении химической энергии в электрическую. Хотя Вольта и заметил, что поверхности приведенных в контакт разнородных металлов, составляющих гальваническую пару, подвергаются изменению (окисляются), тем не менее он не придал этому факту никакого значения. А. Вольта предложил кроме столба еще и несколько иную конструкцию источника электрического тока – так называемую чашечную батарею, действие которой, по его мнению, также было основано на контакте между двумя металлами.

Чашечная батарея представляла собой соединение отдельных элементов, имевших форму банок, наполненных разбавленной серной кислотой, в которую погружались одна медная и одна цинковая пластины. Кроме предложенных А. Вольта конструкций источника электрического тока вскоре были разработаны некоторые другие его модификации. Создание вольтова столба подготовило почву для закладки фундамента электротехники. Современник А. Вольта, выдающийся французский ученый, академик Доменик Франсуа Араго (1786–1853) считал вольтов столб «самым замечательным прибором, когда-либо изобретенным людьми, не исключая телескопа и паровой машины». В этом определении нельзя усматривать преувеличения. Вольтов столб – это первый источник непрерывного электрического тока, сыгравший громадную роль как в развитии науки об электричестве, так и в расширении его практических приложений. В различных модификациях он долгое время оставался самым распространенным источником электрического тока.

Крупнейшие ученые первой половины XIX в. В. В. Петров, X. Дэви, А. Ампер, М. Фарадей широко применяли вольтов столб для своих опытов. Научный вклад итальянского ученого был высоко оценен его современниками. Легенды об А. Вольта ходили среди ученых уже при его жизни. Создав вольтов столб, А. Вольта подарил миру, как писал один из его биографов, «невиданный ранее источник электричества, не порциями, как от банок и электрофоров, а непрерывным потоком». Заслуживают внимания трактат А. Вольта «Об идентичности гальванического и электрического флюидов», его высказывания о «сходстве» электричества и магнетизма. Современники называли А. Вольта самым великим физиком, жившим в Италии после Галилея. В 1881 г. на Международном конгрессе электриков в Париже единице напряжения было присвоено наименование «вольт».

Первые же опыты с электрическим током не могли не привести к открытию некоторых присущих ему свойств. Поэтому рассматриваемый период в истории электричества характеризуется главным образом обнаружением и изучением различных действий электрического тока. Масштабные исследования электрического тока в первые годы XIX в. привели к открытию его химических, тепловых, световых и магнитных действий. В 1800 г. вскоре после получения известия об изобретении вольтова столба члены Лондонского королевского общества Антони Карлейль 1768– 1840) и Вильям Никольсон (1753–1815) [5] произвели ряд опытов с вольтовым столбом, которые привели их к открытию нового явления: при прохождении тока через воду имело место выделение газовых пузырьков; исследовав выделявшиеся газы, они правильно установили, что это кислород и водород. Таким образом, впервые был осуществлен электролиз воды. Вскоре после опубликования работ А. Карлейля и В. Никольсона (1800) немецкий физик Иоганн В. Риттер (1776–1810) также осуществил разложение воды током. После открытия действия тока на воду ряд ученых заинтересовался вопросом о том, к каким результатам приведет пропускание тока через другие жидкости. В том же 1800 г. голландский химик Вильям Крейкшенк (1745–1800), пропуская ток через раствор поваренной соли, получил на отрицательном полюсе едкий натр, не подозревая, что здесь имела место вторичная реакция: поваренная соль разлагалась на Na и Cl, причем натрий, соединяясь с водой, образовывал едкий натр. Указанные эксперименты положили начало исследованию химических действий гальванического тока, получивших впоследствии важное практическое применение. Тепловые действия тока были обнаружены в результате накаливания тонких металлических проводников и воспламенения посредством искр легко воспламеняющихся веществ. Световые явления наблюдались в виде искр различной длины и яркости.

В 1802 г. итальянский ученый Джованни Д. Романьози (1761–1835) обнаружил, что электрический ток в проводнике вызывает отклонение свободно вращающейся магнитной стрелки, находящейся вблизи этого проводника. Однако тогда, в первые годы изучения электрического тока, явление, открытое Д. Романьози, имевшее, как впоследствии выяснилось, громадное значение, не получило должной оценки. Только позднее, в 1820 г., когда наука об электричестве достигла более высокого уровня, магнитное действие тока, описанное датским физиком Гансом Христианом Эрстедом (1777–1851), стало предметом глубокого и всестороннего изучения. Среди многочисленных исследований явлений электрического тока, проведенных в первые годы после построения вольтова столба, наиболее выдающимися были труды первого русского электротехника, профессора физики Санкт-Петербургской медикохирургической академии, академика Василия Владимировича Петрова (1761–1834) (рис. 2.4): в них впервые была показана и доказана возможность практического применения электричества.

Поистине трагическая судьба постигла этого выдающегося ученого, который в истории русской физики, по словам бывшего президента Академии наук СССР академика С. И. Вавилова, по значению своих трудов «непосредственно следует за М. В. Ломоносовым». Какие же заслуги нужно было иметь сыну скромного приходского священника в г. Обояни (Курской губернии), чтобы удостоиться звания академика Петербургской академии наук, значительная часть членов которой имела знатное происхождение, а многие были иностранцами! Несмотря на то что В. В. Петров был не только талантливым физиком и химиком, но и блестящим педагогом, основателем первого крупного физического кабинета, «превосходнейшего во всей Российской империи», он постоянно испытывал враждебное отношение официальных кругов. После смерти В. В. Петрова делается все для того, чтобы имя его было забыто. И это удалось: целое поколение русских физиков в течение полувека (1834–1886) ничего не знали о своем выдающемся соотечественнике. И только в 1886 г. был обнаружен его главный труд «Известия о гальвани- вольтовских опытах» (СПб., 1803). Книга вызвала огромный интерес. Видные физики выступают с докладами о вкладе В. В. Петрова в отечественную электротехнику, в 1887 г. в журнале «Электричество» появляется первая статья о забытом русском ученом. В 30-х гг. ХХ в. были проведены более полные исследования трудов В. В. Петрова, а в 1935 г. Президиум ЦИК СССР принял постановление «Об ознаменовании столетия со дня смерти первого русского электротехника академика В. В. Петрова». В своих трудах по электричеству В. В. Петров собрал обширный опытный материал, который им был тщательно проанализирован: он глубоко понимал значение эксперимента для всестороннего изучения явлений природы. В. В. Петров писал: «...гораздо надежнее искать настоящего источника электрических явлений не в умствованиях, к которым доселе только прибегали почти все физики, но в непосредственных следствиях самих опытов». Будучи хорошо знакомым с опытами, проводимыми с вольтовым столбом как в России, так и за границей, В. В. Петров пришел к правильному выводу о том, что наиболее полное и всестороннее изучение гальванических явлений возможно только при условии создания большой батареи, т. е. в современной терминологии – источника электрической энергии высокого напряжения. Поэтому он добивается у руководства Санкт-Петербургской медико-хирургической академии выделения средств для постройки «такой огромной величины батареи, чтобы оною можно было надежнее производить такие новые опыты», каких не производил никто из физиков.

В апреле 1802 г. батарея В. В. Петрова, состоявшая из 4200 медных и цинковых кружков, или 2100 медно-цинковых элементов (В. В. Петров называл ее «огромная наипаче батарея»), была готова. Она располагалась в большом деревянном ящике, разделенном по длине на четыре отделения (рис. 2.5). Стенки ящика и разделявших его перегородок были покрыты сургучным лаком. Общая длина гальванической батареи В. В. Петрова составляла 12 м – это был крупнейший в мире источник электрического тока. Как показали современные экспериментальные исследования с моделью батареи В. В. Петрова, электродвижущая сила этой батареи составляла около 1700 В, а максимальная полезная мощность – 60–85 Вт. Ток короткого замыкания батареи не превышал 0,2 А. Вначале В. В. Петров производил, как он указывал, уже известные опыты других физиков, а потом старался производить и такие опыты, «...о которых дотоле не имел никакого известия».

В. В. Петрову было хорошо известно, с каким интересом относятся в России к изучению явлений электрического тока. Поэтому в своей книге он подробно описал не только опыты с гальванической батареей, но и способы ее изготовления, ухода за ней, методику экспериментов и т. п. В книге В. В. Петрова описаны его опыты по электролизу различных жидкостей, исследованию явлений прохождения электрического тока в разреженном воздухе, наблюдению «светоносных» явлений, сопровождающих действие электрического тока, изучению тепловых действий тока. В. В. Петров впервые подошел к пониманию того, что действие батареи основано на химических процессах, происходящих в медно-цинковом гальваническом элементе, и правильно установил роль крайних металлических кружков, которые служили лишь проводниками электричества. Он также верно указал на то, что окисление поверхности металлических кружков вызывает ослабление действия батареи. Петровым была впервые установлена важнейшая закономерность в электрической цепи – зависимость тока в проводнике от площади поперечного сечения проводника. Он правильно указал на то, что при увеличении площади поперечного сечения проводника ток в нем возрастает. Поэтому В. В. Петров раньше всех предшественников Г. Ома, сформулировавшего в 1826 г. известный закон, носящий его имя, установил, что через вещества, обладающие большим сопротивлением, гальвани-вольтовская жидкость (так он называл электрический ток. – Авт.) может протекать лишь тогда, когда «количество ее весьма знатно увеличится», т. е. в современной термино- логии – при повышении напряжения в цепи. Термин «сопротивление» введен в электротехнику В. В. Петровым.

Наибольший интерес из всех работ В. В. Петрова представляет открытие им в 1802 г. явления электрической дуги между двумя угольными электродами, соединенными с полюсами созданного им источника высокого напряжения. Создание источника высокого напряжения явилось необходимым условием для получения устойчивой электрической дуги при небольших токах. Опыты В. В. Петрова указывали на возможность применения электричества для целей освещения, плавки металлов и восстановления металлов из их оксидов. Широкая практическая реализация этих прогрессивных идей В. В. Петрова началась лишь спустя 75–80 лет. Но ни изобретатель первой широко распространенной дуговой электрической лампы («электрические свечи») П. Н. Яблочков, ни изобретатели электросварки и электроплавки металлов Н. Н. Бернардос и Н. Г. Славянов ничего не знали о трудах В. В. Петрова, имя и труды которого, как уже упоминалось, в течение полувека после его смерти умышленно замалчивались реакционным руководством Министерства просвещения и Российской академии наук. Открытие электрической дуги приписывалось X. Дэви, и она была известна под названием «вольтова дуга», хотя А. Вольта к ее открытию не имел никакого отношения. До В. В. Петрова никто так четко не указывал на возможность практического применения электричества. Таким образом, В. В. Петров является одним из основоположников электротехники. До В. В. Петрова физики не могли наблюдать явления дуги, так как они использовали небольшие гальванические батареи, состоявшие большей частью из 100–200 элементов; ЭДС таких батарей были недостаточны для получения устойчивой дуги при огромных внутренних сопротивлениях батарей того времени. Известному английскому ученому Хэмфри Дэви (1778–1829) удалось получить электрическую дугу только в 1808 г., когда им была построена большая гальваническая батарея, состоявшая из 2000 элементов. Подробное описание явления электрической дуги X. Дэви дал в 1812 г., при этом он сам ни в какой степени не претендовал на первенство в открытии этого явления. В. В. Петровым было положено начало всестороннему исследованию явлений электрического разряда в вакууме. Он установил зависимость этих явлений от материала, формы и полярности электродов, расстояния между ними и степени вакуума. Позднее эти выводы получили подтверждение и развитие в трудах других ученых, в частности М. Фарадея. Пропуская электрический ток через разные жидкости и тела, В. В. Петров исследовал влияние материала и формы электродов на протекающие процессы. Он применял самые разнообразные электроды: железные, серебряные, медные, оловянные, золотые, древесно-угольные, графитовые, марганцевые и др. В. В. Петровым была правильно определена степень электропроводности некоторых веществ (древесного угля, льда, серы, фосфора, растительных масел) и выявлены их физико-химические свойства. В. В. Петров впервые применил параллельное соединение электродов для демонстрации явления электролиза в нескольких трубках с водой, происходящего одновременно при пропускании электрического тока через жидкости.

Работа В. В. Петрова с источником тока высокого напряжения не могла не привести его к выводу о важном значении изоляции проводов; им было предложено изготовлять электрические проводники, покрытые сургучом или воском. Разработанный В. В. Петровым принцип изоляции проволочных проводников, заключающийся в покрытии их поверхности изолирующим слоем, нашел дальнейшее развитие в производстве кабельных изделий. Ученый пришел к правильному выводу о высоких электроизоляционных свойствах жирных (растительных) масел. В. В. Петров явился одним из первых физиков, высказавших правильный взгляд на общность и различие в проявлениях статического и гальванического электричества. Он сделал попытку выяснить сущность электрических явлений, установить причины образования электричества, однако при состоянии науки того времени такую задачу решить было невозможно. Заслуживает внимания мысль В. В. Петрова о том, что электрические явления обусловлены определенными физико-химическими процессами. Труды В. В. Петрова были хорошо известны его современникам и изучались русскими физиками первой трети XIX в. Широкое распространение трудов В. В. Петрова в России оказало большое влияние на развитие науки об электричестве, на расширение его практического применения. Первые электрохимические опыты, произведенные вскоре после изобретения вольтова столба, вызвали значительный интерес. Специальному исследованию электрохимических явлений были посвящены труды X. Дэви, имевшие важное значение для практики. X. Дэви своими опытами доказал несостоятельность господствовавшего в то время среди ученых мнения, о том, что при электролизе соды на одном полюсе получается кислота, а на другом – основание. Он показал, что кислоты и основания, получаемые при электролизе, являются продуктами последующих вторичных реакций. Повторив опыты разложения воды в разных условиях (стеклянные, агатовые и золотые сосуды; в воздухе и в атмосфере водорода), X. Дэви доказал, что пресная вода разлагается при электролизе только на кислород и водород, причем объем водорода, образовавшегося при этом, вдвое больше объема кислорода. Он установил, что химически чистая вода не поддается электролизу и что электрический ток только разлагает соединения, но не создает никаких новых соединений. X. Дэви одним из первых высказал правильные взгляды на то, что электрический ток, полученный от вольтова столба, возникает в результате химических процессов между металлами и электролитом. В 1807 г. X. Дэви впервые получил электролитическим путем щелочные элементы – калий и натрий, ранее неизвестные в чистом виде; в 1808 г. им были также получены магний, бор, барий, стронций и кальций. Эти открытия демонстрировали практическую ценность электролиза и еще больше усилили интерес ученых к химическим действиям тока. В 1802–1807 гг. ряду ученых, в том числе профессору Московского университета Петру Ивановичу Страхову (1756–1827), опытным путем удалось установить, что земля и вода являются проводниками тока. Этим открытием была показана возможность применения земли и воды в качестве обратного (второго) провода в устройствах для передачи электрического тока от генератора к приемникам. В 1807 г. профессор Московского университета Федор Федорович Рейс (1778–1852) обнаружил явление, впоследствии названное электроосмосом.

В выводах из своих опытов Ф. Ф. Рейс указывает, что под действием электричества жидкость может переноситься сквозь пористые тела. Явление электроосмоса в современной технике получило практическое применение, в част-ности при осушке намывных плотин (электродренаж). Широкое применение вольтовых столбов и других источников электрического тока не могло не усилить интереса к вопросу о том, в результате каких действий в них появляется электрический ток. Становилось понятным, что химические реакции в гальванических элементах являются первичными, а возникновение тока есть их следствие, т. е. явление вторичное. Контактная теория А. Вольта становилась малоубедительной, и ей все чаще стали противопоставлять химическую теорию гальванизма, согласно которой возникновение электричества определяется химическими процессами. Эта теория впервые наиболее четко была разработана петербургским академиком Георгом Парротом (1767–1852), считавшим, что явления в вольтовом столбе и других гальванических элементах происходят исключительно за счет окисления металлов, т. е. за счет изменения одного из веществ элемента.

М. Фарадей также выступал против контактной теории электричества, указывая, что нет такого случая, даже при ударах электрического угря и ската, когда электричество получалось бы без затраты какого-либо другого вида энергии. Многочисленные опыты по электролизу различных жидкостей вскоре привели к необходимости объяснения механизма электролиза, вызвали потребность в теоретических обоснованиях происходящих явлений. Теории электролиза были предложены рядом ученых, но наиболее приближенной к современным воззрениям на процессы электролиза явилась теория электролиза литовского профессора Теодора Гротгуса (1785–1822), которая была, по существу, первой ионной теорией электролитических явлений. Т. Гротгус в 1805 г. опубликовал «Мемуар о разложении при помощи гальванического электричества воды, а также растворенных в ней тел».

Теория Т. Гротгуса была передовой для своего времени, она продержалась в науке более 70 лет, уступив место теории электролитической диссоциации. Известные законы электролиза были сформулированы М. Фарадеем в 1833–1834 гг. Им же были предложены термины «электрод», «анод», «катод».

**Занятие 4. Создание первых электрических машин и источников освещения, измерительных приборов**

**Первые электрические машины**

Открытие законов электродинамики Ампером (1822 г.) и законов электромагнитной индукции Фарадеем (1831 г.) не только опровергли старые представления об отсутствии связи между механическими и электрическими явлениями природы, но и создали теоретические предпосылки возможностей получения как механической работы за счет электрической энергии (электродвигатель), так и получения электрической энергии за счет механической работы (электрогенератор).

Для удобства обозрения периода начального развития электрических машин, совпадающего по времени с периодом победы и укрепления капитализма, целесообразно использовать схематическую диаграмму, охватывающую период с 1831 г. — года опубликования работ Фарадея по электромагнитной индукции — до 1871 г. — начала внедрения электрических машин Грамма.

На представленной диаграмме верхняя ветвь посвящена деятельности изобретателей электрического двигателя, а нижняя — деятельности изобретателей электромеханического генератора.



Каждая ветвь имеет свои характерные, качественно отличные периоды развития, указанные на диаграмме, и своих деятелей. Даты характерных изобретений помечены на диаграмме. Кроме того, на диаграмме имеется связующая верхнюю и нижнюю ветвь линия, относящаяся к открытию в 1838 г. академиком Э. X. Ленцем обратимости генераторного и двигательного режимов электрических машин.

Рассмотрим каждую из ветвей диаграммы отдельно. Изобретатели электрического генератора стимулировались в своей работе низким эффектом и большими неудобствами единственных в то время генераторов электрического тока — химических генераторов: вольтова столба или гальванических батарей.

Основой изысканий явился 1871 труд Фарадея, результат которого диктовал им принципиальное решение задачи — движение проводника в магнитном поле.

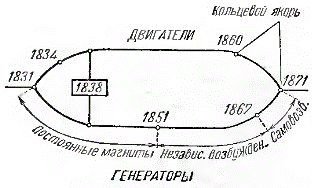
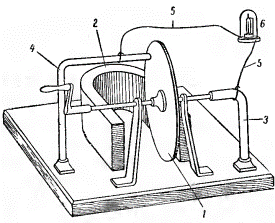


Схема развития ранних электрических двигателей и генераторов постоянного тока

В опытах Фарадея магнитное поле создавалось применением естественных магнитов, что определило качественное содержание первого этапа развития электромагнитных генераторов, охватывающего период с 1831 по 1851 г. Этот этап характеризуется прежде всего применением постоянных магнитов для получения магнитного поля.

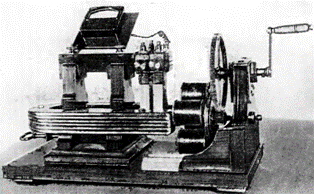
При вращении проводника в виде катушки с намотанной на нее изолированной проволокой этот проводник двигался то параллельно, то перпендикулярно к магнитным силовым линиям, вследствие чего генерируемый ток носил синусоидальный характер, изменяясь и по величине и по направлению. Этот, как сейчас его называют, однофазный переменный ток не находил себе применения, и поэтому второй существенной характеристикой первого этапа развития генераторов явились устройства для выпрямления переменного тока — выпрямляющие коммутаторы.



Магнитоэлектрический генератор Фарадея, известный как «диск Фарадея», завершающий этап его исследований по электромагнетизму: 1 — медный диск;, 2 — подковообразный постоянный магнит, 3— осевой токосниматель, 4 — периферийный токосниматель, 5 — провода, 6 — гальванометр.

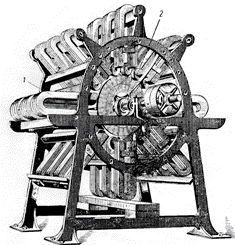
В качестве одного из примеров раннего генератора первого этапа изображен генератор из лаборатории Э. X. Ленца.

Около полюсов постоянного подковообразного магнита вращаются пять катушек, для ускорения вращения которых предусмотрена зубчатая передача от большой шестерни к малой. Катушки вращались вручную. Обмотки каждой катушки соединялись с пластинками барабанного коммутатора, по которому скользили контакты. Коммутатор был устроен так, чтобы подавать в цепь ток постоянного направления.



Магнитоэлектрический генератор из лаборатории Э. X. Ленца

Потребность в большем эффекте механических генераторов тока привела к концу первого этапа к своеобразной конструкции компании «Альянс», разработанной Нолле (Бельгия), ван Мальдереном (Франция) и Холмсом (Англия). В этом генераторе установлено 24 постоянных магнита по восьми радиусам по три в ряду. У полюсов этих магнитов проходили, вращаясь, 32 катушки с проводником. Ток, генерируемый в катушках, поступал к 32 пластинам коллектора, с которых снимался посредством роликов.

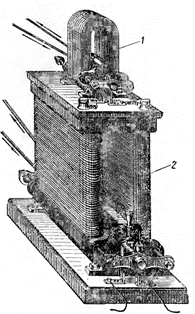


Общий вид генератора «Альянс»: 1 — один из 24 подковообразных магнитов, 2— одна из 36 вращающихся катушек.

Дальнейшее развитие генераторов по линии увеличения числа магнитов и катушек становилось затруднительным, и генератор «Альянс» явился заключающей машиной первого этапа. Генераторы «Альянс» использовались для питания током дуговых фонарей маяков; в 1857—1865 гг. в эксплуатации находилось около 100 таких машин. Одна из них приводилась в движение паровой машиной мощностью около 10 л. с.

Второй период развития генераторов, длившийся с 1851 по 1867 г., характеризуется отказом от постоянных магнитов и заменой их электромагнитами, причем для питания током электромагнитов использовался отдельный источник тока в виде магнитоэлектрической машины первого этапа или в виде гальванической батареи. Примером такого генератора с независимым возбуждением электромагнитов может служить генератор англичанина Уайльда.

Генератор состоит из двух самостоятельных генераторов, расположенных один над другим и отличающихся тем, что верхний небольшой генератор имеет постоянные подковообразные магниты 1, а нижний — электромагниты с обмоткой 2, питаемой током от верхнего генератора. Оба приводятся в движение ремнями от двигателя.



Генератор Уайльда: 1 — постоянные магниты; 2 — электромагниты.

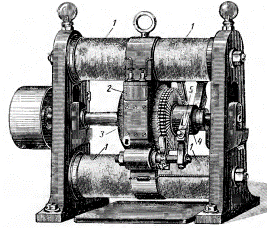
Машины с независимым возбуждением неизбежно подготовили начало третьего этапа развития генераторов. Действительно, при эксплуатации таких машин легко было установить, что машина не только генерирует ток, будучи питаемой током возбуждения от собственной катушки, но вследствие явления остаточного магнетизма позволяет генерировать ток от состояния покоя. Так возникли электромеханические генераторы тока с самовозбуждением, получившие широкое распространение с 1867 г.

Первый патент на машину с самовозбуждением был получен датчанином Хиортом еще в 1854 г., но опасаясь, что самовозбуждение будет недостаточным, Хиорт поставил в своем генераторе и постоянные магниты. Поэтому машина Хиорта, как переходный тип, не привлекла к себе должного внимания.

Однако в 1866 г. английские инженеры Кромвель и Самуэль Варли, а в начале 1867 г. в один и тот же день немец Вернер Сименс и англичанин Уитстон получили патенты на генераторы с независимым возбуждением.

Теперь вопрос заключался только в изыскании наиболее целесообразных конструктивных форм для того, чтобы наилучшим, наиболее эффективным способом использовать на практике принцип самовозбуждения.

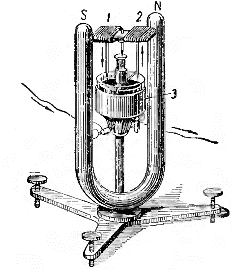
Решающий шаг в этом вопросе был сделан французским изобретателем, бельгийцем по происхождению, Граммом в 1870—1871 гг. Грамм построил генератор с самовозбуждением, придав якорю генератора форму кольца, состоящего из пучка проволоки. Обмотки электромагнитов питались током якоря последовательно: внешняя цепь—коллектор— якорь — коллектор — электромагниты — внешняя цепь. Кольцевой якорь совершенно устранял пульсации тока, значительно увеличивал к.п.д. и уменьшал размеры и вес генератора на единицу развиваемой мощности.



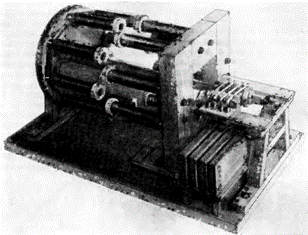
Одна из конструкций генератора Грамма с кольцевым якорем: 1 — обмотки электромагнитов; 2 — полюсные наконечники, охвагы-вающие кольцевой якорь 3; 4 — коллектор; 5 — токосниматель.

В генераторе Грамма совершенно отчетливо проявилась на практике обратимость генераторного и двигательного режимов, установленная еще Э. X. Ленцем (1838 г.) Поэтому на диаграмме линия двигателя и генератора сливаются в точке, соответствующей 1871 г.

Электрические двигатели также имели свои характерные для них качественно отличные этапы развития.

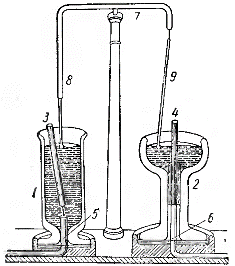


Двигатель Риччи: 1, 2 — катушки; 3 — ртутный токоподводящий коммутатор.



Электродвигатель Б. С. Якоби

Первый этап развития электрического двигателя постоянного тока (1831—1834) берет свое начало от опыта Фарадея, открывшего явления взаимного вращения магнитов и электрических токов. Если через систему, состоящую из чашки со ртутью 1, проводника 8 — 7 — 9, второй чашки со ртутью 2 с выходом проводника в точке 6, пропускать электрический ток от гальванической батареи, то магнит 3 и проводник 9 получат под действием тока вращательное движение.

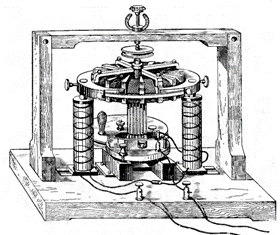


Этот опыт начал первый этап, характеризующийся конструированием физических приборов, показывающий процесс преобразования электрической энергии в механическую работу.

На втором этапе электрический двигатель выходит за стены научной лаборатории. Этот этап характеризуется практическим направлением конструкторов-изобретателей (1834—1860), предусматривающих замену паровой машины — универсального двигателя XIX в. — электрическим двигателем.

Для второго этапа показательны работы Б. С. Якоби, сконструировавшего в 1834 г. первый образец своего электрического двигателя. П-образные электромагниты этого двигателя располагались двумя группами: одна группа неподвижно закреплена, другая может вращаться. Электромагниты обеих групп питались током от гальванической батареи таким образом, что полярность электромагнитов изменялась, создавая силы притяжения или отталкивания, приводившие к вращению группы подвижных электромагнитов.

Из электрических двигателей, получивших практическое применение в 50-х и 60-х годах XIX в., следует отметить двигатель французского инженера Фромана, применявшийся для привода типографских машин. Электромагниты этого двигателя расположены по окружности (шесть пар, на рисунке верхние две пары сняты для того, чтобы лучше показать якорь двигателя с железными пластинами, притягиваемыми и отталкиваемыми электромагнитами).



Электродвигатель Пачинотти

Второй период завершился созданием двигателя итальянским профессором Пачинотти, который за десять лет до Грамма, в 1860 г., сконструировал кольцевой якорь. Якорь вращался вокруг вертикальной оси между полюсными наконечниками двух электромагнитов. Якорь и электромагниты питались током последовательно, как в генераторе Грамма.

Разница состояла только в том, что в машине Грамма кольцевой якорь вращался в плоскости электромагнитов, а в машине Пачинотти — в плоскости, перпендикулярной к плоскости электромагнитов. Характерен тот факт, что Пачинотти указал, что его двигатель может работать в генераторном режиме, т. е., будучи приведенным во вращение, станет вырабатывать электрический ток.

Таким образом, на диаграмме линия развития генераторов сошлась с линией развития двигателей на машине постоянного тока с самовозбуждением и кольцевым якорем, способной работать как двигатель и как генератор тока.

**Электрическое освещение**

Идея использования электрической энергии для освещения появилась еще у первых исследователей гальванического электричества. В 1801 г. Л. Ж. Тенар, пропуская через платиновую проволоку электрический ток, довел ее до белого накала. В 1802 г. русский физик В. В. Петров, получив впервые электрическую дугу, заметил, что ею может быть освещен «темный покой». Тогда же он наблюдал электрический разряд в вакууме, сопровождавшийся свечением.

Несколько лет спустя английский ученый Г. Дэви также высказывал мысль о возможности освещения электрической дугой. Таким образом, в экспериментальных работах начала XIX в. уже были выявлены три принципиально разные возможности электрического освещения, реализованные позднее в лампах накаливания, дуговых и газоразрядных осветительных приборах, однако до практического их освоения было тогда далеко.

Первые попытки были направлены на создание источника света, действующего вследствие накаливания проводника током. В 1820 г. французский ученый Деларю предложил цилиндрическую трубку с двумя концевыми зажимами для подвода тока и платиновой спиралью в качестве тела накала. Лампа Деларю оказалась непригодной для практического использования. Изобретательская мысль обратилась к отысканию приемлемых материалов для тела накала и технологии его получения.

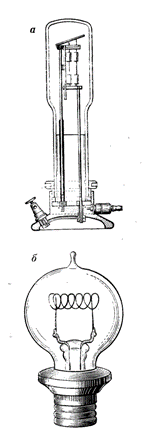


Бельгийский инженер Жобар в 1838 г., русский изобретатель Барщевский в 1845 г., немецкий механик Г. Гебель в 1846 г., английский физик Д. В. Свон в 1860 г. предлагали новые конструкции и усовершенствования, но ощутимого успеха достигнуто не было. В то же время было установлено, что в качестве тела накала могли быть использованы платина, обугленные растительные волокна или ретортный уголь. Правда, платина была слишком дорогостоящей, а уголь — недолговечным. Для увеличения времени службы лабораторных образцов Г. Гебель в 1856 г. поместил тело накала в вакуум.

К 1860 г. относится создание русским подполковником В. Г. Сергеевым оригинального прожектора (лампы-фары), предназначенного для освещения минных галерей. Телом накала в лампе служила платиновая спираль; предусматривалось водяное охлаждение прибора.

Заметный прогресс в создании электрических осветительных приборов наступил в 70-е годы благодаря работам русского изобретателя А. Н. Лодыгина и американского изобретателя Т. А. Эдисона. В течение 1873—1874 гг. Лодыгин неоднократно устраивал временное электрическое освещение на улицах и в общественных зданиях Петербурга с помощью созданных им светильников.

В качестве тела накала в них использовались стержни из ретортного угля; для увеличения долговечности в ряде образцов (конструкции Лодыгина—Дидрихсона) монтировали несколько стерженьков, автоматически включавшихся взамен сгоравших, а из баллонов откачивали воздух. Лодыгин первым продемонстрировал практическую пригодность и эксплуатационное удобство ламп накаливания, преодолев барьер скептического отношения многих ученых и инженеров к принципиальной возможности осуществления этого вида освещения.



Конструкция лампы накаливания: а - Лодыгина—Дидрихсона, б - Эдисона

В 1879 г. Эдисон, добившись получения высококачественных материалов для тела накала и улучшения откачки воздуха из баллона, создал лампу с продолжительным сроком службы, пригодную для массового употребления. Особенно стремительное развитие электрического освещения начинается после освоения технологии изготовления вольфрамовых нитей. Способ применения вольфрама (или молибдена) для тела накала впервые дал А. Н. Лодыгин, предложивший в 1893 г. накаливать платиновую или угольную нить в атмосфере хлористых соединений вольфрама (или молибдена) вместе с водородом. Начиная с 1903 г. австрийцы Юст, Ф. Ханаман стали использовать идею Лодыгина в промышленном производстве ламп накаливания.

Введение электрического освещения способствовало развитию различных отраслей электротехники (электромашиностроения, электроизоляционной техники, приборостроения) и в конечном счете создавало объективные условия для перехода к централизованному электроснабжению.

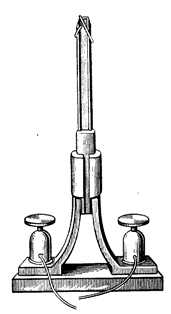
На определенном этапе важная историческая роль в развитии электротехники принадлежала также дуговому освещению. Интерес к разработке дуговых источников света проявился несколько позже, чем к лампам накаливания, так как казалось, что создать конструкцию дуговой лампы, в которой бы обеспечивалась неизменность расстояния между электродами по мере их сгорания, затруднительно. Кроме того, долгое время не удавалось разработать технологию изготовления качественных угольных электродов.

Первые дуговые лампы с ручным регулированием длины дуги построили французы — ученый Ж. Б. Л. Фуко и электротехник А. Ж. Аршро в 1848 г. Эти лампы годились лишь для кратковременного подсвечивания. Изобретательская мысль направляется на создание автоматических регуляторов с часовыми механизмами и с электромагнитными устройствами. В 50—70-х годах это были наиболее распространенные электроавтоматические устройства. Дуговые лампы с регуляторами получили некоторое применение на маяках, для освещения гаваней и больших помещений, требующих интенсивной освещенности.

Однако конструкции электродуговых светильников с регуляторами, на усовершенствование которых было затрачено много усилий, не могли служить для массового применения. Радикальное решение проблемы было найдено русским изобретателем П. Н. Яблочковым, предложившим в 1876 г. дуговую лампу без регулятора — «электрическую свечу».

Решение Яблочкова было гениально просто: расположить электродные угли, изолировав их тонким слоем каолина, параллельно один другому и поставить вертикально. В таком положении по мере сгорания углей расстояние между ними не менялось — они сгорали подобно свече, и нужда в регуляторе отпадала. В процессе совершенствования своего изобретения Яблочков пришел к интереснейшим решениям, которые существенно отразились на всем ходе развития электротехники.

Прежде всего это относилось к освоению на практике переменных токов. В течение всего предшествующего периода применение электричества базировал исключительно на постоянном токе. Сложилось убеждение, что переменный ток не пригоден для технических целей. Для питания же свечей, как заметил Яблочков, лучше подходил переменный ток, обеспечивавший равномерное сгорание обоих углей. В короткий срок осветительные установки по системе Яблочкова были переведены на питание переменным током. Естественным результатом был увеличившийся спрос на генераторы однофазного переменного тока.



Электрическая свеча П. В. Яблочкова

Яблочкову принадлежит заслуга решения задачи освещения любым числом ламп от одного генератора. До него каждая дуговая лампа должна была иметь свой источник тока. Яблочков разработал несколько весьма эффективных схем «дробления электрической энергии», одна из которых — дробление посредством индукционных катушек — легла в основу построения электроэнергетических установок переменного тока, а сами индукционные катушки стали заметной вехой на пути создания трансформатора. В схемах Яблочкова впервые появились основные элементы современных энергетических установок: первичный двигатель, генератор, линия передачи и приемники.

Электрические свечи Яблочкова, названные «русский свет», в конце 70-х годов появились на улицах и в общественных зданиях многих столиц мира; они проникли в производственные корпуса крупных заводов, на строительные площадки, верфи и т. п. С осени 1878 г., после основания в Петербурге предприятия П. Н. Яблочкова по изготовлению электрических машин и аппаратов, введение электрического освещения в Россия также заметно ускорилось.

Рост установок дугового электрического освещения вызывал потребность в мощных источниках тока. Появление динамомашины — экономичного электромашинного генератора — способствовало расширению сферы энергетического применения электричества. Разработка относительно дешевого и доступного приемника электрической энергии повлекла за собой зарождение идеи централизованного производства электроэнергии. Таким образом, электродуговое освещение, не войдя в дальнейшем. в практику столь широко, как освещение лампами накаливания, сыграло большую историческую роль в развитии новых направлений электротехники.

**Занятие 5. Основные признаки появления электрификации. Переменный ток и трехфазные системы электроснабжения**

Годом рождения электрификации вполне можно считать 1891 г., когда состоялось генеральное испытание трехфазной системы на Международной электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне.

Поводом к организации этой выставки явились затруднения обербургомистра Франкфурта в выборе рода тока для центральной электростанции города.

Вопрос «постоянный или переменный ток?» являлся предметом научных дискуссий в течение 80-х годов прошлого столетия. Авторитетная международная комиссия, созданная по просьбе обербургомистра, тоже не пришла к соглашению и не смогла дать определенных рекомендаций. Поэтому было решено организовать международную электротехническую выставку и дать возможность всем желающим лицам и фирмам продемонстрировать свои предложения и технические возможности. Была организована международная испытательная комиссия под предселательством немецкого ученого Германа Гельмгольца. В число членов комиссии входил русский инженер Р. Э. Классон. Предполагалось, что комиссия проведет испытания всех предложенных систем и даст ответ на вопрос о выборе рода тока и перспективной системы электроснабжения.



Организаторы Франкфуртской выставки по инициативе видного немецкого электротехника О. фон Миллера предложили фирме АЭГ, в которой в то время работал Доливо-Добровольский, передать посредством электричества энергию водопада на р. Неккар (близ местечка Лауфен) на территорию выставки во Франкфурт. Расстояние между этими двумя пунктами составляло 170 км. В Лауфене в распоряжение строителей передачи выделялась турбина, дававшая полезную мощность около 300 л.с.

До этого времени дальность электропередачи, не считая нескольких опытных установок, не превышала 15 км, и некоторые компетентные специалисты полагали, что кпд установки может оказаться ниже 50 %.

Правление фирмы АЭГ согласилось осуществить электропередачу, и Доливо-Добровольскому предстояло в течение года (!) спроектировать и построить асинхронный двигатель мощностью около 75 кВт и трехфазные трансформаторы мощностью 100 - 150 кВА.

Изготовление генератора было поручено главному инженеру швейцарского завода «Эрликон» Ч. Броуну, который сотрудничал с Доливо-Добровольским в области конструирования многофазных машин. Срок был чрезвычайно коротким, а задачи — весьма ответственными: во-первых, новая система тока должна была подвергнуться испытанию перед лицом представителей всего мира; во-вторых, масштабы испытания были невиданными.

Двигатели и трансформаторы на такие мощности еще никогда не строились. Об опытных конструкциях не могло быть и речи. Доливо-Добровольский писал по поводу возникшей задачи: "Если я не хотел навлечь на мой трехфазный ток несмываемого позора и подвергнуть его недоверию, которое вряд ли удалось бы потом быстро рассеять, я обязан был принять на себя эту задачу и разрешить ее. В противном случае опыты Лауфен — Франкфурт и многое, что должно было затем развиваться на их основе, пошли бы по пути применения однофазного тока".

В августе 1891 г. на выставке впервые зажглись 1000 ламп накаливания, питаемых током от Лауфенской гидростанции. 12 сентября того же года двигатель Доливо-Добровольского привел в действие декоративный водопад. Налицо была своеобразная энергетическая цепь, небольшой искусственный водопад приводился в действие энергией естественного водопада, удаленного от первого на 170 км.

Что же представляла собой эта первая трехфазная линия?

На гидроэлектростанции в Лауфене энергия, развиваемая турбиной, передавалась через коническую зубчатую передачу на вал трехфазного генератора 230 кВ, 150 об/мин, соединение обмоток в звезду. От генератора медные шины вели к распределительному щиту. На последнем были установлены амперметры и вольтметры, свинцовые предохранители и максимально-минимальные токовые реле, воздействовавшие на цепь возбуждения.

В Лауфене и Франкфурте находилось по три трехфазных трансформатора с магнитопроводом призматической формы. В начале испытаний на каждом конце линии было включено по одному трансформатору мощностью 150 кВА каждый, с коэффициентами трансформации 154 в Лауфене и 116 во Франкфурте. Поскольку приборов для измерения высокого напряжения не было, вторичное напряжение определяли простым умножением первичного на коэффициент трансформации. Трансформаторы были погружены в баки, наполненные маслом.

Трехпроводная линия была выполнена на деревянных опорах со средним пролетом около 60 м. Медный провод диаметром 4 мм крепился на штыревых фарфорово-масляных изоляторах. Интересной деталью линии являлась установка плавких предохранителей со стороны высокого напряжения. В начале линии в разрыв каждого провода был включен участок длиной 2,5 м, состоявший из двух медных проволок диаметром 0,5 мм каждая. Для отключения линии во Франкфурте посредством простого приспособления устраивалось трехфазное короткое замыкание, плавкие вставки перегорали, турбина начинала развивать большую скорость, и машинист, заметив это, останавливал ее.

На выставочной площадке во Франкфурте был установлен понижающий трансформатор, от которого при напряжении 65 В питались 1000 ламп накаливания, расположенных на огромном щите. Здесь же был установлен трехфазный асинхронный двигатель Доливо-Доброгидравлический насос мощностью окаю 100 л.с. Двигатель был выполнен обращенным, то есть с питанием со стороны ротора.

Одновременно с этим мощным двигателем Доливо-Добровольский экспонировал асинхронный трехфазный двигатель мощность около 100 Вт, с вентилятором на его валу и двигатель мощностью 1,5 кВт с сидящим на его валу генератором постоянного тока, последний питал лампы накаливания.

Перед пуском электропередачи возникли неожиданные затруднения. Дело в том, что линия пересекала территории четырех германских земель, и местные власти очень опасались высокого напряжения. Люди испытывали страх перед деревянными столбами с табличками, на которых был изображен череп. Знающих людей смущало то, что оборудование на электростанции было заземлено, как заземлена была и нейтраль трансформатора. В связи с этим очень опасались обрыва провода и падения его на землю.

Выставочный комитет провел огромную разъяснительную работу, убеждая местных правительственных чиновников в том, что все опасности предусмотрены и линия надежно защищена. Доливо-Добровольскому пришлось провести опасный, но убедительный эксперимент. На границе двух земель собрались представители местных властей. Включили линию под напряжение и на глазах у присутствующих искусственным путем оборвали провод, который с яркой вспышкой упал на рельсы железной дороги. Доливо-Добровольский сейчас же подошел и поднял провод голыми руками — настолько он был уверен, что спроектированная им защита сработает надежно.

25 августа 1891 г. официальный пуск линии состоялся. Несмотря на то, что линия, машины, трансформаторы, распределительные щиты изготовлялись в спешке, что некоторые детали но свидетельству Доливо-Добровольского придумывались в течение часа, вся установка, включенная без предварительных испытаний, сразу же стала работать вполне хорошо. Доливо-Добровольский, ставший знаменитым изобретателем, рассказывал, что среди непосвященной публики существовало мнение, будто в этом выставочном водопаде журчит «настоящая вода из Неккара», переданная во Франкфурт по проводам.

Испытания электропередачи, которые проводились Международной комиссией, дали следующие результаты: минимальный кпд электропередачи (отношение мощности на вторичных зажимах трансформатора во Франкфурте к мощности на валу турбины в Лауфене) — 68,5 %, максимальный кпд — 75,2 %; линейное напряжение при испытаниях составляло около 15 кВ.

Характерен заключительный вывод комиссии: «...работа линии с переменными токами напряжением от 7500 до 8500 В (фазное — авт.), изолированной маслом, фарфором и воздухом, длиной больше ста километров, протекала всегда равномерно, безопасно и без нарушений, как и работа с переменными токами напряжением в несколько сотен вольт и при длине линии в несколько метров». Было также проведено дополнительное испытание линии электропередачи при более высоком напряжении — 25,1 кВ. Максимальный кпд составил 78,9 %.

Результаты испытаний электропередачи Лауфен — Франкфурт не только продемонстрировали возможности электрической передачи энергии, но и поставили точку в давнем споре. В борьбе «постоянный — переменный ток» победила техника переменного тока. Как на любопытный рецидив уходившей в историю борьбы идей, можно указать на следующее свидетельство М. О. Доливо-Добровольского: «В сентябре 1889 г. Эдисон посетил Берлин. При сделанном ему предложении осмотреть новый электродвигатель переменного тока он буквально замахал руками: «Нет, нет, переменный ток — это вздор, не имеющий будущего. Я не только не хочу осматривать двигатель переменного тока, но и знать о нем». И он не пришел!

Эта же электропередача убедительно показала, что среди систем переменного тока преимущества находятся на стороне трехфазных систем. Международная электротехническая выставка и приуроченный к ней Международный конгресс электротехников (7—12 сентября 1981 г., Франкфурт-на-Майне) открыли этой системе электрических токов широкий путь в промышленность. Начиналась эпоха электрификации.

Возникновение техники трехфазных токов решало не только задачу использования электроэнергии, но и ее передачи на значительные расстояния. Оно знаменовало собой новый, современный этап в развитии электроэнергии и обусловило переход к широкой электрификации.

Трехфазная система впервые демонстрировалась на Международной электротехнической выставке 1891 г. во Франкфурте-на-Майне. По инициативе видного немецкого электроэнергетика О. фон Миллера организаторы выставки обратились к фирме АЭГ, где работал Доливо-Добровольский, с просьбой устроить передачу энергии мощностью 300 л. с. от водопада на р. Неккар (близ Лауфена) на территорию выставки.

Под руководством М. О. Доливо-Добровольского была сооружена линия передачи протяженностью 175 км при линейном напряжении около 15 кВ. На выставке горела тысяча ламп накаливания, асинхронный двигатель мощностью 100 кВт нагнетал воду для декоративного водопада. Максимальный КПД передачи составлял 75,2%, что в то время убедительно доказывало экономичность энергетической установки.

После закрытия выставки гидростанция в Лауфене перешла в собственность города Хейльбронна и использовалась для питания осветительной сети города и ряда небольших заводов и мастерских. Это была первая промышленная установка трехфазного тока.



В 1892 г. была готова электропередача Бюлах — Эрликон в Швейцарии, а затем довольно быстро был введен в работу ряд электростанций в Германии. В Америке первая установка трехфазного тока введена в Калифорнии в 1893 г. и в том же году в России на Новороссийском элеваторе. Примечательно, что мощность установки в Новороссийске (1200 кВт) превосходила все существовавшие до того трехфазные электростанции.

Внедрение системы трехфазных токов протекало в атмосфере напряженной борьбы. Противниками этой системы были в США Эдисон, в Англии — Свинберн, в Австро-Венгрии — Дери, в Швейцарии — Броун. Все они были главами или представителями ведущих электротехнических фирм, которые в течение ряда лет активно внедряли одни постоянный, другие — однофазный или двухфазный переменный ток.

Их сопротивление было сломлено на рубеже XIX—XX столетий, когда со всей определенностью выявились преимущества техники трехфазного тока. Она обусловила возможность концентрации производства электроэнергии и передачи ее токами высокого напряжения на значительные расстояния.

По мере строительства высоковольтных сетей возрастало их напряжение: в середине 90-х годов оно не превышало 10 кВ, а к концу столетия вводятся линии напряжением 50—60 кВ. Система трехфазного тока способствовала быстрому внедрению в производство относительно более дешевых и надежных асинхронных электродвигателей.

Процесс электрификации промышленных предприятий сопровождался вытеснением паровой машины из системы привода и ограничением ее назначения в качестве первичного двигателя, т. е. ее переходом из производственных цехов в машинные залы электростанций.

Эксплуатация мощных дуговых электропечей была связана с существенными трудностями из-за огромных толчков тока — номинальный ток печей достигал нескольких сотен ампер.

На технологический процесс решающее значение оказывали характеристики самой дуги. В частности, удлинение дуги способствовало экономичности печей, так как дуга при этом делалась более устойчивой и улучшалась передача тепла к металлу. Для придания дуге желаемой формы и размеров прибегали, начиная с первой печи Сименса, к установке электромагнитов.

Удачный способ удлинения дуги был найден русским инженером С. И. Тельным (1916 г.): в под печи закладывался медный соленоид, включенный последовательно с электродами; взаимодействие электромагнитного поля соленоида с дугой приводило дугу во вращение, отчего она удлинялась.

Продолжались поиски рациональных методов индукционного нагрева. В 1900 г. швед Ф. А. Челлин изобрел индукционную печь, питаемую током нормальной частоты (для выплавки цветных металлов). В 1907 г. А. Н. Лодыгин предложил нагревать и плавить металлы с помощью вихревых токов. В промышленных установках в первом десятилетии XX в. использовали трехфазные индукционные печи Рёхлинг -Роденгаузера и Челлина.

В конце прошлого века электрохимия, электрометаллургия и электротермия вошли в тесное взаимодействие. Со временем эти направления электротехники выделились в самостоятельные отрасли науки и техники. Эти электроемкие производства развивались по мере централизации производства электроэнергии и ее удешевления. Наиболее перспективным в данном случае оказалось электроснабжение от гидроэлектрических станций. В России, не располагавшей мощными ГЭС, электроемкие производства развились незначительно. В основном электроэнергию использовали для электропривода.

В рассматриваемый период электротехника выделялась из физики и становилась самостоятельной отраслью техники и промышленности. В 90-е годы на основе развивающейся системы трехфазного переменного тока обрела самостоятельность электроэнергетика. Это повлекло за собой глубокие преобразования во всех отраслях общественного производства. Начался переход от механических систем передачи энергии к электроприводу рабочих машин.

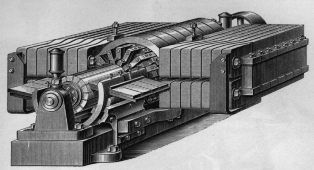
**Занятие 6. Первые электростанции, трансформаторы и линии электропередач**

Начальный период электрификации связан с использованием постоянного тока. После удачных опытов применения динамомашин в 70-х годах XIX в. возникли небольшие генераторные установки для питания одной определенной нагрузки: дуговой лампы, электрического двигателя или гальванической ванны. Это был этап децентрализованного производства электрической энергии.

Следующей ступенью в развитии электроснабжения стало питание от общего генератора ряда приемников — от домовых электростанций; затем возникли станции местного значения, служившие для электроснабжения городского квартала или завода — так называемые блок-станции. Они вырабатывали ток низкого напряжения (порядка 100 - 200 В), что резко ограничивало протяженность электрических сетей.

Первые блок-станции возникли в Париже для питания свечей Яблочкова. В России первой станцией такого рода была установка для освещения Литейного моста в Петербурге, построенная в 1879 г. при участии. П. Н. Яблочкова. В конце 1881 г. появились блок-станции, в сети которых включались дуговые лампы и лампы накаливания, например станция в Честерфилде (Англия) и станция в Лубянском пассаже в Москве.

Вместе с ростом числа потребителей электроэнергии увеличивались мощности электростанций и все более отчетливо проявлялась тенденция централизации электроснабжения.



Первая центральная электрическая станция была построена Т. А. Эдисоном в 1882 г. на Пирльстрит в Нью-Йорке для питания осветительной нагрузки. Ее общая мощность превышала 500 кВт. В 1883 г. возникла центральная электрическая станция в Петербурге для освещения Невского проспекта.

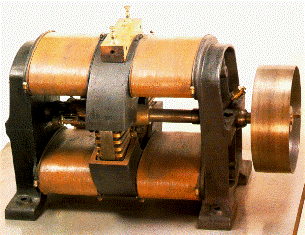
Эксплуатация первых ЦЭС обнаружила недостаток, не преодоленный в течение всего времени применения постоянного тока: ограниченный радиус электроснабжения, определяемый величиной допустимых потерь напряжения в электрической сети. Это обстоятельство заставляло сооружать электростанции вблизи от потребителей, главным образом в центральных частях города, что, в свою очередь, затрудняло снабжение водой и топливом и было сопряжено с высокой стоимостью земельных участков. Поэтому в Нью-Йорке в тот период были вынуждены прибегнуть к многоэтажному размещению станционного оборудования, а в Петербурге первые электростанции были установлены на баржах на реках Мойке и Фонтанке.

С ростом потребителей электроэнергии начинаются настойчивые поиски путей увеличения расстояния передачи энергии. Эффективными оказались трехпроводные сети по схеме, предложенной в 1882 г. Д. Гопкинсоном и независимо от него Т. А. Эдисоном. Этот способ обеспечивал повышение напряжения в линии вдвое и нашел весьма широкое распространение.

Еще более эффективной была пятипроводная сеть, так как напряжение при этом возрастало вчетверо. Автором схемы был В. Сименс. Она не нашла широкого признания, так как при увеличении радиуса электроснабжения всего до 1,5 тыс. м устройство сети существенно усложнялось.

Другой путь увеличения дальности передачи состоял в сооружении аккумуляторных подстанций. Мощность электростанций постоянного тока редко превышала 500 кВт, однако большое их число, построенное за последние два десятилетия XIX в., определяло их существенную долю в общей выработке электроэнергии.

К 90-м годам централизованное электроснабжение стало определяющим для электрического освещения, но не распространялось на силовое электрооборудование. Электрификация рабочих машин в заводских условиях носила ярко выраженный децентрализованный характер: электрифицировали отдельно стоящие крупные машины и механизмы, для которых устанавливали самостоятельные динамомашины.



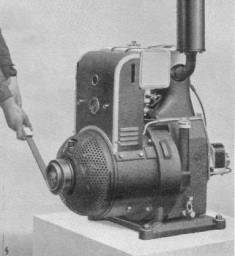
Для приведения в действие группы станков через трансмиссии (крупнотрансмисснонный электропривод) вместо паровой машины устанавливали относительно крупные электродвигатели, питаемые от отдельных генераторов. Опыт применения электрических двигателей для приведения в действие разнообразных машин-орудий постепенно убеждал в их большей экономичности по сравнению с приводом от паровой машины. В начале 90-х годов начинается электрификация силовых процессов в горнозаводской и металлообрабатывающей промышленности, в текстильном производстве и т. п.

Крупная промышленность выдвинула к концу XIX в. ряд совершенно новых требований к ведению самого производства. Увеличилась его сложность и точность, произошло ускорение темпов технологических процессов, развились непрерывные виды производства, расширились площади промышленных предприятий — все это усложнило задачу управления системой машин. В ряде случаев человек оказывался не в состоянии справиться с механическими операциями без специальных дополнительных средств. Ярким примером такого производства стала металлургическая промышленность.

В начале 90-х годов электрический привод проникает на металлургические заводы США для производства проката и для осуществления загрузки мартеновских и доменных печей. В этот период зарождается автоматическое управление процессами пуска, торможения, остановки и скоростью электродвигателей с помощью релейно-контакторной аппаратуры, а также появляются схемы электромашинной автоматики.

Предвестником электромашинной автоматики следует считать изобретение русского электротехника В. Н. Чиколева — его дифференциальную лампу с электродвигателем для регулирования положения углей в дуговой лампе (1874 г.). Следующим шагом на пути к электромашинному регулированию была схема генератор — двигатель М. О. Доливо-Добровольского (1890 г.) для электродвигателей с сериесным возбуждением, с помощью которой обеспечивалась примерно постоянная скорость вращения при значительных изменениях нагрузки.

В 1892 г. американский инженер В. Леонард предложил способ плавного и в широких пределах регулирования по схеме генератор — двигатель, ставшей классической. Она нашла широкое применение для электропривода прокатных станов и подъемников начиная с 1903 г., когда немецкий инженер К. Ильгнер сделал дополнение к схеме Леонарда в виде махового колеса для выравнивания толчкообразной нагрузки. Эту систему электромашинного управления используют до настоящего времени.



С 70-х годов развертываются работы по применению электрической энергии на транспорте. В 80 - 90-х годах XIX в. появляются первые электрические железные дороги и электрический трамвай. Электрическая тяга развивалась преимущественно на постоянном токе.

Электрические двигатели постоянного тока по мере их распространения в различных отраслях промышленности приобрели репутацию универсального и безотказного источника механической энергии.

Электропривод обеспечивал простоту и быстроту пуска, возможность регулирования скорости вращения, компактность и легкость, приспособляемость к любым производственным процессам при меньших эксплуатационных затратах на единицу продукции по сравнению с паровым приводом. Однако ограниченные возможности передачи электроэнергии на расстояние постоянным током не могли обеспечить широкой электрификации.

Сто лет назад это неприметное устройство позволило осуществить на практике распределение электроэнергии. Хотя современная электротехника и телекоммуникации немыслимы без этого устройства, оно остается одним из "невоспетых героев" в истории технического прогресса.

Научно-техническая революция, определявшая развитие цивилизации в течение двух последних столетий, явилась следствием фундаментальных открытий и изобретений в области электротехники и связи. Такие технические средства, как телефон и телевизор, прочно вошли в нашу повседневную жизнь.

А вот изобретение, благодаря которому мы получили доступ к электроэнергии, остается в тени, хотя и играет в нашей жизни очень важную роль. Это устройство неприметно, оно не движется, работает практически бесшумно и, как правило, скрыто от наших глаз в отдельных помещениях или за экранирующими перегородками.

Речь идет о трансформаторе. Изобретенный в XIX веке трансформатор является одним из ключевых компонентов современной электроэнергетической системы и радиоэлектронных устройств. Он преобразует высокие напряжения в низкие (и наоборот) почти без потерь энергии.

Трансформатор - важный элемент многих электрических приборов и механизмов. Зарядные устройства и игрушечные железные дороги, радиоприемники и телевизоры - всюду трудятся трансформаторы, которые понижают или повышают напряжение. Среди них встречаются как совсем крошечные, не более горошины, так и настоящие колоссы массой в 500 тонн и более.

**Открытие электромагнитной индукции Майклом Фарадеем**

Явление, лежащее в основе действия электрического трансформатора, было открыто английским физиком Майклом Фарадеем в 1831 г. при проведении им основополагающих исследований в области электричества. Спустя примерно 45 лет появились первые трансформаторы, содержавшие все основные элементы современных устройств.

Это событие стало настоящей революцией в молодой тогда области электротехники, связанной с созданием цепей электрического освещения. На рубеже веков электроэнергетические системы переменного тока стали уже общепринятыми, и трансформатор получил ключевую роль в передаче и распределении электроэнергии. А в дальнейшем он также занял существенное место как в технике электросвязи, так и в радиоэлектронной аппаратуре.

Современные трансформаторы превосходят своих предшественников, созданных к началу XX столетия, по мощности в 500, а по напряжению - в 15 раз; их масса в расчете на единицу мощности снизилась приблизительно в 10 раз, а коэффициент полезного действия близок к 99%.

В своих экспериментах Фарадей опирался на результаты датского физика **Ханса Кристиана Эрстеда**, который в 1820 г. установил, что ток, проходящий по проводнику, создает вокруг него магнитное поле. Открытие Эрстеда было воспринято с большим интересом, поскольку электричество и магнетизм считались до этого проявлениями совершенно различных и независимых друг от друга сил. И уж если электрический ток мог порождать магнитное поле, то казалось вполне вероятным, что магнитное поле в свою очередь могло порождать электрический ток.

В 1831 г. Фарадей показал, что для порождения магнитным полем тока в проводнике необходимо, чтобы поле было переменным. Фарадей изменял напряженность магнитного поля, замыкая и прерывая электрическую цепь, порождающую поле. Тот же эффект достигается, если воспользоваться переменным током, т. е. током, направление которого меняется со временем. Это явление взаимодействия между электрическими и магнитными силами получило название электромагнитной индукции.

**Принцип действия трансформатора**

В трансформаторе обмотка из витков провода, подключенная к источнику питания и порождающая магнитное поле, называется первичной. Другая обмотка, в которой под действием этого поля возникает электродвижущая сила (ЭДС), называется вторичной.

Индукция между первичной и вторичной обмоткой взаимна, т. е. ток, протекающий во вторичной обмотке, индуцирует ЭДС в первичной точно так же, как первичная обмотка индуцирует ЭДС во вторичной. Более того, поскольку витки первичной обмотки охватывают собственные силовые линии, в них самих возникает ЭДС. Это явление, называемое самоиндукцией, наблюдается также и во вторичной обмотке.

На явлении взаимной индукции и самоиндукции основано действие трансформатора. Для эффективной работы этого устройства необходимо, чтобы между его обмотками существовала связь и каждая из них обладала высокой самоиндукцией. Этим условиям можно удовлетворить, намотав первичную и вторичную обмотки на железный сердечник так, как это сделал Фарадей в своих первых экспериментах.

Железо увеличивает количество силовых линий магнитного поля приблизительно в 10 000 раз. О материалах, обладающих таким свойством, говорят, что они имеют высокую магнитную проницаемость. Кроме того, железный сердечник локализует поток магнитной индукции, благодаря чему обмотки трансформатора могут быть пространственно разделены и все же оставаться индуктивно связанными.

В идеальном трансформаторе все силовые линии проходят через все витки обеих обмоток, и поскольку изменяющееся магнитное поле порождает одну и ту же ЭДС в каждом витке, суммарная ЭДС, индуцируемая в обмотке, пропорциональна полному числу ее витков.

Если в трансформаторе не происходит потери энергии, мощность в цепи вторичной обмотки должна быть равна мощности, подводимой к первичной обмотке. Другими словами, произведение напряжения на силу тока во вторичной обмотке должно быть равно произведению напряжения и тока в первичной.

Таким образом, токи оказываются обратно пропорциональными отношению напряжений в двух обмотках и, следовательно, отношение токов обратно пропорционально отношению числа витков в обмотках. Такой подсчет мощности справедлив лишь в том случае, если токи и напряжения совпадают по фазе; условие высокой самоиндукции обеспечивает пренебрежимо малую величину токов, не совпадающих по фазе.

**Идеальный трансформатор**

Идеальный трансформатор представляет для инженеров-электриков инструмент, аналогичный рычагу в механике, но вместо преобразований силы и перемещения трансформатор преобразует напряжение и ток. Вместо отношения плеч силы количественной характеристикой трансформатора является отношение между числом витков в его обмотках.

Конечно, идеального трансформатора не существует, но практически реализованные устройства очень близки к идеальным. Железный сердечник является непременной составной частью всех современных силовых трансформаторов, а медь благодаря своему низкому электрическому сопротивлению была и остается основным материалом, из которого изготовляют провод для обмоток.

**Эксперементы с "индукторами"**

После своего открытия Фарадей не стал детально исследовать открытое явление, полагая, что его работу продолжат другие. Однако в действительности оказалось, что в течение нескольких последующих десятилетий устройства, подобные трансформаторам, не нашли широкого практического применения.

Особый интерес представляли первые эксперименты с "индукторами", состоящими из провода, намотанного на железный сердечник, в частности, изучение способности этих устройств порождать искры, когда ток в обмотке прерывался.

Среди известных ученых, занимавшихся этим явлением, был американец Джозеф Генри, первый секретарь и директор Смитсоновского института. Впоследствии его именем была названа единица индуктивности.

В этих экспериментах выяснилось, что токи, циркулирующие в сплошных металлических сердечниках, рассеивали энергию. Чтобы свести к минимуму эти так называемые вихревые токи, сердечники стали делать непроводящими в направлении, перпендикулярном магнитным силовым линиям трансформатора. Теперь сердечники представляли собой "связку" изолированных железных проводов.

**Первые трансформаторы и электрическое освещение**

В то время в качестве источников питания для работы с трансформаторами использовались батареи, а чтобы получить необходимые изменения тока, первичная цепь периодически прерывалась и замыкалась. После того как в 60-х годах XIX была изобретена динамо-машина - генератор электроэнергии, также основанный на открытиях Фарадея, - появилась возможность использовать переменный ток.

Первый, кто подсоединил трансформатор к источнику переменного тока был **Уильям Гроув**, которому для его лабораторных опытов понадобился источник высокого напряжения. Но этот опыт оставался незамеченным до тех пор, пока Томас Альва Эдисон не начал работать над осуществлением идеи электрического освещения в 1880-х годах.

К этому времени уже существовали электрические лампы с платиновыми нитями накала и лампы на основе электрической дуги, или дугового разряда между двумя электродами. Лампы обоих типов работали неплохо, однако их электрические характеристики накладывали некоторые ограничения на способы их включения в электрическую цепь. В частности, все лампы подключались последовательно, подобно елочным гирляндам, поэтому они загорались и гасли одновременно.

Хотя такой способ был приемлем, например, для уличного освещения, невозможность включать и выключать отдельные лампы в произвольные моменты времени, а также высокое напряжение, необходимое при последовательном соединении большого числа осветительных приборов, препятствовали его применению в жилых домах и на небольших предприятиях.

Способ же параллельного соединения, в котором каждая лампа работает в своей собственной цепи, требовал слишком толстых медных проводов для подведения достаточно сильного тока к лампам, имевшим в то время относительно низкое сопротивление.

Одним из главных изобретений Эдисона была лампа накаливания с угольной нитью, открывшей благодаря своему высокому сопротивлению путь к практической реализации систем параллельного подключения осветительных приборов. Используя эти лампы накаливания и генератор постоянного тока, Эдисон в 1882 г. создал в Нью-Йорке первую промышленную систему электрического освещения.

**Изобретение Голара**

Приблизительно в то же время трансформаторы были впервые применены в системах электрического освещения в Англии. Французский изобретатель **Люсьен Х. Голар** и английский промышленник **Джон Д. Гиббс** воспользовались трансформаторами для подсоединения ламп накаливания к осветительной системе на дуговых лампах. Поскольку дуговые лампы соединялись последовательно, первичные обмотки трансформаторов находились в последовательном соединении с дуговыми лампами.

В 1882 г. Голар и Гиббс получили патент на свое устройство, названное ими вторичным генератором. Его работу они продемонстрировали в 1883 г. в Англии, а в 1884 г. - в Италии. Вторичный генератор не нашел широкого применения, однако он стимулировал создание других устройств.

Среди тех, кто заинтересовался работой Голара и Гиббса, были три венгерских инженера из будапештской фирмы Ganz and Company. Они присутствовали при демонстрации действия вторичного генератора в Италии и пришли к выводу, что последовательное соединение имеет серьезные недостатки.

По возвращении в Будапешт **Макс Дери, Отто Т. Блажи** и **Карл Циперовский** сконструировали и изготовили несколько трансформаторов для систем параллельного соединения с генератором.

Их трансформаторы (с замкнутыми железными сердечниками, которые значительно лучше подходили для параллельного соединения, чем "связки" железных проводов с открытыми концами) были двух типов. В первом типе провод наматывался на тороидальный сердечник, во втором, наоборот, железные провода сердечника наматывались вокруг тороидальной "связки" проводников.

В мае 1885 г. Дери, Блажи и Циперновски продемонстрировали на национальной выставке в Будапеште свою систему, которую принято считать прототипом современных осветительных систем. Она состояла из 75 параллельно соединенных трансформаторов, подводивших питание к 1067 лампам накаливания Эдисона от генератора переменного тока с напряжением 1350 В. Трансформаторы имели тороидальные железные сердечники.

Система Голара и Гиббса произвела также впечатление на американца по имени **Джордж Вестингауз**. В 80-х годах Вестингауз был уже признанным изобретателем и промышленником. В то время он работал над системой распределения природного газа для освещения. После успехов, достигнутых Эдисоном, Вестингауз заинтересовался новым источником энергии, но сомневался в возможности ее широкого применения.

Его скептицизм был в достаточной степени оправданным. В параллельных системах увеличение нагрузки требовало увеличения силы тока, а нагрузка в масштабах целого города потребовала бы колоссальных токов. Однако передача электроэнергии при больших токах неэффективна. Нужно было либо передавать ток по очень толстым медным проводам, либо строить электростанции в непосредственной близости от потребителя, разбросав множество мелких генераторов по всей территории города.

**Трансформаторы используются в системах передачи электроэнергии**

Многие специалисты искали способы передачи электроэнергии при более высоком напряжении по сравнению с тем, которое требовалось в потребляющих устройствах.

В 1884 г. Вестингауз нанял молодого инженера **Уильяма Стэнли**, у которого возникла идея воспользоваться трансформатором для решения проблемы передачи электроэнергии. Узнав о работе Голара и Гиббса, он посоветовал Вестингаузу приобрести патенты на трансформатор.

Стэнли был убежден в преимуществах параллельных схем соединения, и к началу лета 1885 г. им уже было создано несколько трансформаторов с сердечниками замкнутой формы.

Вскоре в связи с ухудшившимся состоянием здоровья Стэнли вынужден был уехать вместе со своей лабораторией из промышленного задымленного Питтсбурга. С одобрения Вестингауза он переселился в Грейт-Бэррингтон, шт. Массачусетс, где продолжал работать над трансформаторами.

Тем временем Вестингауз, еще не до конца убежденный в эффективности параллельного соединения, экспериментировал с различными комбинациями вторичных генераторов Голара и Гиббса вместе с другим пионером в области электротехники **Оливером Б. Шелленбергером**.

**Трансформаторы Стенли - Вестингауза**

К декабрю 1885 г. успехи, достигнутые Стэнли, наконец, убедили Вестингауза и он вместе с Шелленбергом и еще одним блестящим инженером **Альбертом Шмидомм** приступил к усовершенствованию трансформатора Стэнли, с тем чтобы он (в отличие от венгерского торроидального устройства) стал простым и дешевым в производстве.

Сначала сердечник изготавливался из тонких железных пластин в форме буквы Н. Обмотки из изолированной медной проволоки наматывались на горизонтальную часть сердечника, свободные концы которого замыкались дополнительными слоями железных полосок.

Стэнли предложил изготавливать железные пластины в форме буквы Ш, чтобы центральный стержень можно было легко вставлять в заранее намотанную катушку. Ш-образные пластины укладывались в чередующихся противоположных направлениях, а на концы пластин укладывались прямые железные полоски для замыкания магнитной цепи. Эта конструкция трансформатора применяется и в наши дни.

Сердечники первых трансформаторов Стэнли - Вестингауза состояли из тонких пластин листовой стали и характеризовались значительными потерями на гистерезис - так называется эффект "запоминания" в магнитных материалах, уменьшающий коэффициент полезного действия трансформатора. Эти потери постепенно стали снижаться за счет тщательного подбора сортов стали.

**Путь к современным трансформаторам**

В начале 1900-х годов английский исследователь-металлург **Роберт Хедфилд** провел серию экспериментов для установления влияния добавок на свойства железа. Лишь через несколько лет ему удалось поставить заказчикам первую тонну трансформаторной стали с добавками кремния.

Следующий крупный скачок в технологии производства сердечников был сделан в начале 30-х годов XX в, когда американский металлург **Норман П. Гросс** установил, что при комбинированном воздействии проката и нагревания у кремнистой стали появляются незаурядные магнитные свойства в направлении прокатки: магнитное насыщение увеличивалось на 50%, потери на гистерезис сокращались в 4 раза, а магнитная проницаемость возрастала в 5 раз.

Впрочем, усовершенствование трансформаторов и схем электропитания радиоэлектронных устройств, основанных на их применении, продолжается по сей день

**Венская международная выставка 1873 г.**

Первые опыты передачи электрической энергии на расстояние относятся к самому началу 70-х годов. В 1873 г. на Венской международной выставке французский электрик **И. Фонтен** демонстрировал обратимость электрических машин.

Одна из машин Грамма работала в режиме генератора, а такая же вторая — в режиме двигателя. Последняя машина приводила в действие водяной насос искусственного водопада.

Желая несколько снизить мощность двигателя (чтобы вода не выбивалась за пределы бассейна), Фонтен решил увеличить сопротивление проводов, соединявших две машины. Для этого он включил между машинами барабан с кабелем длиной несколько больше 1 км.

Так была показана возможность передачи электроэнергии на более или менее значительное по представлениям того времени расстояние. Вместе с тем сам Фонтен не был убежден в экономической целесообразности электропередачи.

Так как при включении соединительного кабеля он получил значительное снижение мощности двигателя, что свидетельствовало о больших потерях энергии в кабеле.

Если полагать, что требуется передать определенную мощность на расстояние, то из из закона Джоуля-Ленца видно, что потери в линии зависят от напряжения, удельного сопротивления провода и его сечения. Снижение удельного сопротивления проводов практически неосуществимо, так как медь, ставшая основным материалом для изготовления проводов, имеет предельно малое удельное сопротивление. Следовательно, имелись только два пути для снижения потерь в линии: увеличение сечения проводов или повышение напряжения.

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

**Опыты по передаче электрической энергии Пироцкого**

В 1874 г. русский военный инженер **Ф. А. Пироцкий** пришел к выводу об экономической целесообразности производства электрической энергии в тех местах, где она может быть дешево получена благодаря наличию топлива или гидравлической энергии, и передачи ее по линии к более или менее отдаленному месту потребления.

В том же году он приступил к опытам передачи энергии на артиллерийском полигоне Волкова поля (около Петербурга), использовав электрическую машину Грамма. Дальность передачи в опытах Пироцкого составляла сначала более 200 м, а затем была увеличена примерно до 1 км.

Для уменьшения потерь в линии Пироцкий предлагал использовать в качестве проводников железнодорожные рельсы, сечение которых более чем в 600 раз превышало сечение обыкновенного телеграфного провода.

Стремясь проверить свои выводы, он в конце 1875 г. произвел опыты передачи электроэнергии по рельсам бездействовавшей ветки Сестрорецкой железной дороги длиной около 3,4 км Оба рельса изолировались от земли, один из них служил прямым, второй — обратным проводом. Электрический ток шел от небольшого генератора Грамма к электродвигателю, удаленному на расстояние около 1 км.

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

Несмотря на нерациональность практического направления, избранного Пироцким, его опыты привлекли внимание к вопросам электропередачи вообще, вызвали ряд новых исследований, приведших к выявлению правильного пути для решения этой проблемы.

Предложение Пироцкого об использовании железнодорожных рельсов для передачи электрической энергии на расстояние нашло свое применение уже при разработке первых проектов городских электрических железных дорог.

**Передача с помощью повышения напряжения**

Другой путь решения проблемы передачи электрической энергии, основанный на повышении напряжения линии передачи, — путь прогрессивный — был избран французским академиком **М. Депре** и профессором физики Петербургского лесного института **Д. А. Лачиновым**.

В марте 1880 г. в протоколах Парижской академии наук был опубликован доклад М. Депре «О коэффициенте полезного действия электрических двигателей и об измерении количества энергии в электрической цепи», в котором он математически доказывал, что к. п. д. установки, состоявшей из электродвигателя и линии передачи, не зависит от сопротивления самой линии.

Такой вывод показался Депре парадоксальным, так как ему вначале не удалось установить, что увеличение сопротивления линии не влияет на эффективность электропередачи только при определенном условии, а именно при увеличении напряжения передачи. Эти условия впервые были указаны проф. Д. А. Лачиновым в статье «Электромеханическая работа», опубликованной в июне 1880 г. в первом номере журнала «Электричество».

На основе математических выкладок Лачинов показал, что в электропередаче «полезное действие не зависит от расстояния» лишь при условии увеличения скорости вращения генератора (т. е. при повышении напряжения линии, так как э. д. с., развиваемая генератором, пропорциональна скорости вращения).

Большая заслуга в практическом решении вопросов передачи энергии постоянным током на значительные расстояния принадлежит М. Депре. Исходя из ранее разработанных принципов, Депре в 1882 г. строит первую линию электропередачи Мисбах — Мюнхен протяженностью 57 км.

На одном конце опытной линии в Мисбахе была установлена паровая машина, приводившая в действие генератор постоянного тока мощностью 3 л. с., дававший ток напряжением 1,5—2 кв. Энергия передавалась по стальным телеграфным проводам диаметром 4,5 мм на территорию выставки в Мюнхене, где была установлена такая же машина, работавшая в режиме электродвигателя и приводившая в действие насос для искусственного водопада. Эта электропередача работала с перебоями (4 дня из 12) по причине разных неисправностей в сети; ее к. п. д. не превосходил 0,25.

Хотя этот первый опыт и не дал достаточно благоприятных технических результатов, его значение нельзя было недооценивать: электропередача Мисбах — Мюнхен явилась отправным пунктом для дальнейших работ по развитию методов и средств передачи энергии на расстояние.

**Занятие 7. Основные этапы развития электроэнергетики России**

Большинству взрослого населения России и других стран бывшего СССР, на сегодняшний день еще к счастью известно, что широкомасштабная электрификация страны связана с реализацией плана Государственной Электрификации России (ГоЭлРо) принятому в 1920 году.

Справедливости ради, следует отметить, что разработка этого плана относится еще ко времени накануне Первой Мировой Войны, которая, собственно, и помешала тогда его принятию. Но в данной статье речь пойдет не об этом этапе развития энергетики в России, а о предшествовавшем ему периоде, когда электричество только входило в быт населения крупных городов, и было вызывавшей восторг диковиной, символом всесильного Прогресса.

Думается, многие читатели удивятся, но еще и сегодня в старых домах Замоскворечья можно встретить действующую электропроводку, проложенную еще на рубеже 80-90х годов 19 века во время первой электрификации Москвы. Однако мероприятия связанные с этой акцией тоже не были первой вехой на пути победного шествия по территории тогда еще Российской Империи новой движущей силы.

С определением времени начала существования какого-либо явления всегда возникают трудности и разночтения, однако, злоупотребив своим положением, как авторы настоящего текста, мы **обозначим за точку начала в России эры электричества 1879 год** (несогласные могут оспорить эту дату, и если сделают это аргументировано, то мы внесем коррективы в свое видение этой проблемы).

Итак, именно в этом году **в Петербурге был освещен электрическим светом Литейный мост, став первым в мире мостом, освещенным при помощи электричества**. С этим событием связана курьезная история о том, как Городская управа Петербурга продала монополию на освещение улиц частным компаниям, освещавшим их при помощи масляных и газовых фонарей. Литейный же мост, как построенный после заключения этого договора не подпадал под действие соглашения, вследствие этого, электрификация Российской столицы и империи в целом началась именно с моста.

Нам могут возразить, что годом ранее, **в 1878 году** **инженер Бородин** осуществил электрификацию **токарного цеха Киевских железнодорожных мастерских**, в ходе которой цех был освещен четырьмя электрическими дуговыми фонарями. Об этом факте нам известно, но он не выбран в качестве исходной даты в силу своего узковедомственного значения и недоступности лицезрения сего чуда широкой публикой (хотя видимо отбою от любопытных не было).

Следующей вехой на пути внедрения новинки в повседневный быт стало **30 января 1880 года**, когда был **основан электротехнический отдел Русского технического общества**, призванный курировать проблемы электрификации России. В том же году начались работы по освещению улиц Москвы и Петербурга, однако их объем можно считать крайне незначительным – пара сотен ламп на две столицы. Так же в этом же году в Киеве посредством ламп Яблочкова освещены мастерские Днепровского пароходства.

Следует отметить, что на этом этапе электрификации все потребители электроэнергии (каковыми являлись исключительно осветительные приборы) использовали постоянный ток, и существовали определенные проблемы с передачей электроэнергии на значительные расстояния. Вследствие этого источник электроэнергии располагался в непосредственной близости от потребителя. Так, например, в случае с **Киевскими железнодорожными мастерскими** каждый из четырех фонарей имел свою **электромагнитную машину Грамма**.

Спустя ровно два года после коронации в Петербурге императора Александра III, торжества по аналогичному поводу в Москве **15 мая 1883 года** были ознаменованы грандиозной иллюминацией Кремля. Для осуществления этого проекта **на Софийской набережной была построена специальная электростанция**.

В том же году, но уже в столице Империи **фирма «Сименс и Гальске»** освещает центральную улицу города, а чуть позже **электрифицируется Зимний Дворец**. По некоторым данным именно для осуществления этих мероприятий строится едва ли не первая, более-менее крупная **электростанция** в России, **мощностью 35 КВт**. Помимо прочего эта электростанция примечательна тем, что располагалась она на барже пришвартованной к набережной Мойки недалеко от Полицейского моста.

Далее упоминаний о каких-либо крупных событиях связанных с электричеством не встречается в течение ряда лет, пока в 1886 году не становится известно об освещении электричеством парка «Шато-де-Флер» в Киеве (ныне стадион Динамо).

31 июля 1887 года Общество Электрического Освещения, основанное **Карлом Федоровичем Сименсом** (к тому времени принявшим Российское подданство и ставшим купцом первой гильдии), принимает решение о начале работ направленных на практическую электрификацию Москвы. Реализация этих амбициозных планов началась с устройства электрического освещения Постниковского пассажа на Тверской, ныне Театр им. Ермоловой.

Вообще, **«Общество Электрического Освещения 1886 года»**, чей устав был утвержден 4 июля 1886 года высочайшим Указом императора Александра Ш, сыграло огромную роль в начальной электрификации России. После революции 1917 года национализированные мощности этого предприятия были объединены в единую энергосистему, на базе которой сейчас работает в частности АО МОСЭНЕРГО в Москве.

3 февраля 1888 года в Москве заключается договор аренды земли под строительство первой центральной городской электростанции. Электростанция, получившая название Георгиевской (располагалась на углу Большой Дмитровки и Георгиевского переулка) вырабатывала постоянный ток и снабжала электроэнергией потребителей (среди которых появляются и частные домовладельцы) в радиусе полутора верст. Все кабели прокладывались в кирпичных каналах.

В это время, помимо Центральной, в Москве функционирует ряд более мелких электростанций – Городская, освещавшая Каменный мост и площадь храма Христа Спасителя, Университетская, Императорских театров, Дворцовая (освещала Кремль), при вокзалах – Ярославском и Брестском. Примерно так же обстояли дела и в двух других крупнейших городах империи – Петербурге и Киеве. Использование постоянного тока ограничивало длину питающих кабелей, что вынуждало использовать небольшие локальные электростанции.

**3 июля 1892 года в Киеве запущен первый в России электрический трамвай**, линия имела протяженность полтора километра. Мощность питающей электростанции составляла 30 КВт.

1895 год ознаменовался вводом в строй первой в России гидроэлектростанции на реке Большая Охта в Петербурге, причем довольно большой по тем временам мощности – 300 КВт. В том же году, Управление Владикавказской железной дороги построило и ввело в эксплуатацию ГЭС «Белый уголь» на реке Подкумок, между Кисловодском и Ессентуками, дававшую электроэнергию для освещения курортов.

Здесь следует оговориться, что электрификация России в тот период не носила планового централизованного характера, поэтому приводимые нами вехи не являются полным перечнем всех мероприятий по электрификации страны. В домах богатых домовладельцев устанавливались собственные источники электроэнергии, иногда довольно мощные, то же наблюдалась в сельском хозяйстве и усадебном землевладении, однако такие события редко попадали на страницы газет, и соответственно нам о них мало известно.

Важным событием в период начала электрификации страны явилось строительство и **ввод в эксплуатацию электростанции на Раушской набережной**, первой действительно крупной электростанции в России, да к тому же **вырабатывающей переменный трехфазный ток**. Это давало возможность передавать мощности на большие расстояния, используя более высокое напряжение. **28 апреля 1897 года**начался монтаж электрооборудования, а в ноябре того же года электростанция была пущена. Тогда мощность этой паротурбинной электростанции составляла 1470 КВт (уже в ходе Первой Мировой Войны, в 1915 году, была пущена вторая очередь этой электростанции мощностью в 21 МВт).

Самая старая сохранившаяся до сего дня в Москве осветительная бытовая электропроводка запитывалась, видимо, именно от этой электростанции. Потребители получали переменный ток частотой 50 Гц. Напряжение бытовой электросети составляло 127 В.

Со временем, сложилась ситуация, когда электрические трамваи, появившиеся к началу 20 века и в Москве, стали потреблять большую часть электроэнергии, вырабатываемой Раушской электростанцией. Для ее разгрузки в 1907 году у Малого-Каменного моста построена электростанция, предназначенная для энергопитания трамвайной сети. Ее мощность на момент пуска составляла 6000 КВт.

Ниже приведены некоторые даты в какой-то степени характеризующие распространение по территории страны нового источника энергии:

1901 год – запущены первые электростанции в Курске и Ярославле.

1908 год - вступила в строй первая электростанция Читы.

1912 год – пуск электростанции во Владивостоке.

1912-14 гг. – строительство и запуск крупнейшей в мире торфяной теплоэлектростанции «Электропередача» вблизи города Богородска (ныне Ногинск).

1915 год – дата, с которой ведет отсчет своей истории Московский Электроламповый Завод.

И так далее.

Итогом предвоенного развития электроэнергетики России стал выход на суммарную установленную мощность источников электроэнергии в 1100 МВт и выработку 1900000 Мвт/ч в год (данные 1913 года). Что касается гидроэлектростанций, то к 1917 году в России они имели суммарную мощность порядка 19 МВт, и самой мощной ГЭС империи являлась Гиндукушская – 1,35 МВт.

В современной отечественной публицистике доминируют две крайних точки зрения на процесс электрификации нашей страны. Сторонники первой, назовём её традиционной, точки зрения полностью отрицают значимость достижений на этой ниве дореволюционной России.

С целью подтверждения истинности такого взгляда на проблему, зачастую, занижаются данные об объёме производства электроэнергии, допускаются манипуляции критериями сравнения, датами, и размерностями величин. Однако, сложно доказать недоказуемое, электроэнергетика в дореволюционной России существовала, тем или иным образом потребителями электроэнергии являлись до 20% населения страны, **по производству электроэнергии Россия занимала восьмое место в мире.**

Вторая точка зрения состоит в том, что высокие предреволюционные темпы развития российской электроэнергетики произвольным образом экстраполируются на будущие периоды. Сторонники этой точки зрения оперируют умозрительными планами развития отрасли безотносительно оценки возможности их реализации в условиях дореволюционной системы хозяйствования. Не берутся в расчет выдающиеся способности новой администрации по концентрации усилий в ключевых отраслях экономики, а так же в определении этих ключевых отраслей.

Обе эти точки зрения видятся порочными по своей сути, так как нарушают принцип непрерывности истории, отрицают преемственность и последовательность в развитии электроэнергетики страны. Нам кажется, более взвешенным следующий взгляд на вещи: динамичному развитию электроэнергетики в России был нанесен удар началом Первой Мировой Войны, а затем оно было прервано последовательностью социально-политических катаклизмов, потрясших сами устои российской государственности. Этот период, продолжавшийся примерно до конца 1920 года, характеризуется деградацией отрасли несмотря на усилия энергетиков и ряда функционеров новой власти направленные на ее сохранение. Однако в последующие годы эти усилия стали приносить свои плоды.

Следует отметить, что в целом **восстановление электроэнергетики возглавляли те же кадры, которые осуществляли дореволюционную электрификацию России.** Именно, благодаря их опыту и организаторским способностям, а также решительности представителей новых властей, в рамках принятого в декабре 1921 года плана ГОЭЛРО к 1925 году был достигнут предвоенный уровень производства электроэнергии. Реализации этого плана и истории развития электроэнергетики СССР до начало Великой Отечественной Войны и посвящена настоящая статья.

После прихода к власти в октябре 1917 года, большевикам пришлось сразу столкнуться с проблемой снабжения крупных городов и промышленных предприятий энергоносителями. Учитывая возникшие сложности с подвозом угля из донецкого бассейна, нефти и нефтепродуктов с бакинских и грозненских промыслов, новые власти рассматривали электрификацию Москвы и Петрограда, как способ компенсировать дефицит традиционных энергоносителей.

В марте 1918 года с целью улучшения снабжения электроэнергией столиц было запланировано строительство пяти электростанций, однако, в силу ряда причин летом того же года удалось только возобновить строительство Волховской и приступить к строительству Каширской и Шатурской электростанций. Но реализация и этих, сильно урезанных относительно планов, начинаний, была поставлена под угрозу развернувшейся Гражданской Войной – рабочие мобилизовывались на военную службу, материальное обеспечение осуществлялось по остаточному принципу, в результате этого первенцы советской энергетики были введены в строй лишь **в 1922 (Каширская) и в 1926 (Волховская)** годах уже в рамках принятого**в 1921 году плана ГОЭЛРО.**

На фоне такого казенного долгостроя наблюдалось любопытное явление – **строительство местных электростанций** и локальная электрификация силами местных жителей в сельской местности – наиболее известный (но не единичный) пример – **Ярополецкая ГЭС на реке Ламе**, дававшая электроэнергию нескольким близлежащим деревням вплоть до оккупации территории немцами в ходе Великой Отечественной Войны.

В феврале 1920 года была начата разработка советского перспективного плана развития народного хозяйства базирующегося на электрификации страны. Работой комиссии по созданию будущего плана ГОЭЛРО руководил **Г.М. Кржижановский.** В комиссию входили крупнейшие специалисты в области электротехники и энергетики, такие как **Г.О. Графтио, К.А. Круг, М.А. Шателен** и другие, в общем 22 ученых – постоянных членов комиссии и более 200 специалистов из всех отраслей хозяйства привлекавшихся к ее работе по мере необходимости.

При работе над планом использовались принципиальные соображения о развитии электрификации в России сформулированные еще до революции профессором **К. Кленегсборгом**. Стоит отметить, счастливое для отрасли стечение обстоятельств – глава комиссии Г.М. Кржижановский помимо того, что являлся личным другом В.И. Ленина и одним из старейших членов РСДРП(б), был еще и крупным электроинженером, сотрудником «Общества электрического освещения 1886 года» с 1907 года, соратником **Р.Э. Классона** в постройке первой районной электростанции на торфе – «Электропередача». В том числе и этот факт обусловил высокую эффективность работы комиссии, которая позволила ей уже к декабрю 1920 года представить основные положения плана ГОЭЛРО 8-му Всероссийскому съезду Советов, который их единодушно одобрил.

Начались работы по популяризации и реализации плана. В декабре 1921 года 9-й Всероссийский съезд Советов утвердил постановление правительства о конкретных сроках реализации плана, что придало ему силу закона.

Особенность плана ГОЭЛРО состоит в том, что помимо арифметического наращивания мощностей по производству электроэнергии он предполагал комплексное развитие экономики страны на базе новой движущей силы – электричества, объединение его производителей сначала в ряд крупных локальных сетей, а затем, в перспективе, в глобальную энергетическую сеть, чье функционирование направлено на бесперебойное снабжение энергией предприятий тяжелой промышленности, транспорта и других отраслей народного хозяйства России.

Для осуществления энергетических взаимосвязей предусматривалось **широкое строительство высоковольтных линий электропередачи**, недостаток которых являлся одним из узких мест дореволюционной электроэнергетики. (Здесь, справедливости ради, следует отметить, что эта концепция – концепция единой энергетической системы ведет свое начало от соединения в 1915 году на параллельную работу двух электростанций, в Москве и Подмосковье, линией электропередачи на 70КВ, длиной 76 км – к сожалению единственной высоковольтной ЛЭП империи.)

**План ГОЭЛРО** вообще является первым планом развития экономики крупной страны на основе новых технологий, которыми на тот период являлись электротехнические. Его базовые положения – опережающее развитие электрификации на основе концентрации мощностей и централизации электроснабжения сохранили свою значимость для энергетической отрасли страны до сегодняшнего дня, именно от них происходит «блеск и нищета» отечественной электрификации.

Но вернемся к плану ГОЭЛРО, принятому к исполнению в декабре 1921 года. Этот план предусматривал доведение к 1935 году суммарной мощности электростанций до 1750 МВт, а годовое производство электроэнергии до 8,8 млрд. КВтч. Для достижения этих результатов планировалось ввести в действие 30 крупных электростанций (включая уже строящиеся), в т.ч. 10 ГЭС. Первые из них были введены в строй уже в следующем 1922 году, это были уже упоминавшаяся Каширская ГРЭС и электростанция «Красный Октябрь» в Петрограде. В 1924 году введена в эксплуатацию Кизеловская ГРЭС, в 1925 – Нижегородская и Шатурская станции, работавшие на местном торфе. К тому же 1925 году относится начала использования в Москве напряжения бытовой электросети в 220 В. В декабре 1926 года наконец введена в строй Волховская ГЭС. В этом же году в Москве создана первая диспетчерская энергетическая служба.

**В 1927 году начато строительство крупнейшей в Европе гидроэлектростанции – ДнепроГЭСа**. Идея строительства ГЭС на Днепровских порогах витала в воздухе еще с начала века. Первый проект их затопления был создан еще в 1905 году инженерами **Г.О. Графтио** (упоминавшимся выше, как один из разработчиков позднейшего плана ГОЭЛРО) и **С.П. Максимовым**.

Этот проект предусматривал строительство на участке от Днепропетровска до современного Запорожья трех ГЭС общей мощностью до 90000КВт. Тогда этот проект не был осуществлен, но уже 10 августа 1921 года, т.е. еще до утверждения 9-м Съездом Советов сроков реализации плана ГОЭЛРО было принято постановление СНК «об освобождении земель, подлежащих затоплению при строительстве гидроэлектростанции у города Александровска (Запорожье)». Земли под затопление освобождались в соответствии с проектом созданным **И.Г. Александровым** по заданию на проектирование выданное 5 марта 1921 года. Проект был высоко оценен, использовал опыт строительства и эксплуатации таких ГЭС, как «Куинстон» на Ниагаре и «Ла-Габель» на реке Св. Лаврентия. Однако в обстоятельствах 1922 года немедленно приступить к воплощению в жизнь этого проекта было невозможно.

Отечественная промышленность не производила энергоагрегатов требуемой мощности, а экономическая изоляция Советской России еще не была полностью преодолена. Переговоры о приемлемых условиях поставки оборудования затягивались. Все же в 1927 году в основание будущей ГЭС легла закладная пластина. Надвигающийся экономический кризис помог решить проблему с поставкой оборудования – американцы предложили полный цикл строительства ГЭС, вплоть до сдачи ее заказчику, однако было принято паллиативное решение – строительство вели отечественные кадры, но под наблюдением американских консультантов.

**Первый блок был запущен 1 мая 1932 года**, т.е. уже после того, как в 1931 году план ГОЭЛРО был выполнен по основным показателям. После вывода ДнепроГЭСа на полную проектную мощность он стал самой мощной ГЭС в Европе - 560000 КВт.

**В 1933 году введена в строй линия электропередачи напряжением 220кв – Нижнесвирская ГЭС – Ленинград**. Начато объединение в единую сеть электростанций Горького и Иваново.

В конце 20-х – начале тридцатых годов электричество все шире входило в быт, проводились любопытные эксперименты по бытовому применению электроэнергии. Вот, например, что писала в вечернем выпуске от 23 января 1928 года «Красная газета»:

"Откомхоз приступил к рассмотрению вопроса о применении электричества в домашнем быту...

Намечено установить в нескольких квартирах ряд электрических приборов... Для точного выявления выгодности применения электричества эти квартиры попеременно одну неделю будут отапливаться дровами, вторую электроэнергией. Недельные данные покажут, дешевле ли электричество для отопления квартир, чем дрова, какой тариф должен быть установлен на отпуск электроэнергии для домашнего потребления".

Итак, план ГОЭЛРО был выполнен досрочно. К плановому сроку его реализации, 1935 году, установленная мощность электростанций составила 6800 МВт, выработка электроэнергии в соответствующем году достигла 26,3 млрд. КВтч (для сравнения, в 1920 году этот показатель равнялся 0,5 млрд. КВтч).

**В 1936 году СССР вышел на третье место в мире, после Германии и США, по выработке электроэнергии**. В соответствии с принципами, положенными в основу плана ГОЭЛРО отечественная энергетика продолжала развиваться все ускоряющимися темпами, так в 1937 году производство электроэнергии достигло 36,173 млрд. КВтч при мощности всех станций в 8235 МВт, а в 1940 году соответствующие показатели составили уже 48,309 млрд. КВтч и 11193 МВт.

Одновременно возрастала экономичность тепловых электростанций составлявших основу энергетики, так если в 1913 году для производства одного КВтч электроэнергии затрачивалось 1060 г условного топлива, то к 1940 году этот показатель снизился до 598 г.

Электроэнергетика распространялась на Восток страны вместе с развитием восточных промышленных районов. В предвоенные и военные годы быстрыми темпами развивалась энергетика Урала, Сибири и Средней Азии. Именно это позволило компенсировать разрушение в ходе Великой Отечественной Войны 60 только крупных электростанций общей мощностью 6000 МВт, и выйти в 1945 году почти на уровень предвоенных показателей. В этом году было произведено 43,257 млрд. КВтч электроэнергии на электростанциях общей мощностью 11124 МВт.

Подводя итог этому периоду электрификации России следует отметить, что это был период «большого скачка» электроэнергетики нашей страны, который вывел СССР на ведущие роли в мире по производству электроэнергии, однако уже в то время были заложены и те негативные черты, которые к сегодняшнему дню вылились в деформированность отрасли, вызванную чрезмерной централизацией, гигантоманией и ориентированность на абсолютные цифры в ущерб экологичности энергии и интересам мелкого потребителя.

**Занятие 8. Развитие электрооборудования**

Одним из важнейших элементов электроэнергетической установки является трансформатор. Развитие этого аппарата зависело от роста мощностей и напряжений линий электропередачи. Как уже отмечалось, конструкции первых трансформаторов стержневого и броневого типа были разработаны в 70-х годах XIX в.

Первые конструкции трансформаторов были несовершенны, имели большое магнитное рассеяние, так как их первичная и вторичная обмотка располагалась на разных сердечниках магнитопровода. Дальнейшие поиски рациональных конструкций трансформаторов были направлены на уменьшение магнитного рассеяния (прежде всего путем концентрического расположения обмоток), улучшение междувитковой изоляции, разработку систем охлаждения и т. д.

На рубеже 80-х — 90-х годов были сделаны попытки использовать для охлаждения и изоляции обмоток минеральное масло. В течение первых двух десятилетий текущего столетия преимущественное распространение в американских установках получили трехфазные группы из однофазных трансформаторов, а в европейских — трехфазные масляные трансформаторы стержневого и броневого типа с охлаждением циркулирующей водой.



Стержневой и броневой типы трансформаторов сохранились до настоящего времени, причем первый получил преимущественное распространение. В качестве материала обмоток использовали почти исключительно полосовую медь прямоугольного сечения. Иногда, как это было в Германии во время первой мировой войны, строили трансформаторы мощностью до 60 тыс. кВ-А с алюминиевой обмоткой. В целом совершенствование обмоток трансформаторов заключалось в повышении их механической и электрической прочности, теплостойкости, экономичности и улучшении технологических способов изготовления.

Претерпела существенные изменения одна из важнейших конструктивных деталей трансформаторов — вводы высокого напряжения. Для сравнительно невысоких напряжений, порядка 35 кВ, различные фирмы, такие, как «Westinghouse» и некоторые другие, обычно применяли фарфоровые конструкции. Для более высоких напряжений, начиная с 50—60 кВ, наиболее распространенными были две разновидности: конденсаторные вводы и пустотелые с масляным наполнением. Конденсаторные вводы были предложены в Германии в 1906 г.

В трансформаторостроении большую роль играло уменьшение размеров и веса аппаратов. В этом отношении характерны такие показатели: если в 1900 г. масляный трансформатор мощностью 1200 кВ-А весил 18 100 кг, то в 1920 г. этот же тип аппарата той же мощности весил 7550 кг, т. е. его вес составлял всего 41,7% по отношению к образцу 1900 г.

С ростом мощностей электрических станций все более усложнялась задача отключения рабочих токов, особенно токов коротких замыканий. Использовавшиеся для отключения особые высоковольтные устройства — выключатели прошли длительный путь развития. Простейшие коммутационные устройства появились примерно в 20-х годах XIX столетия. Это были металлические стержни, впущенные в сосуды со ртутью. Такими переключателями пользовались Д. Генри и А. М. Ампер («коромысло Ампера») для изменения направления тока в электрических цепях.

Принцип ртутных контактов сохранился в выключателях до начала 90-х годов уже в связи с энергетическими применениями электричества. Подобные аппараты действовали, например, на электростанции в Риме, работавшей на линии передачи напряжением 2 кВ при токе 200 А. Будапештская фирма «Ганц и К0» строила выключатели с ртутными контактами для напряжений до 10 кВ. Но ртутные контакты были неудобными: устройства получались громоздкими, нетранспортабельными, не обеспечивали надежного отключения.

В 90-х годах появились конструкции с подвижными контактными элементами, среди которых автоматический выключатель М. О. Доливо-Добровольского (1893 г.) отличался оригинальностью пластинчатых пружинящих контактов. До тех пор, пока напряжение электрических установок не превышало 15 кВ, а токи 300 А, применение подобных аппаратов было допустимо без специальных средств для гашения дуги. Однако повышение напряжения до 22 кВ, как это было, например, на Ниагарской гидроэлектростанции в 1901 г., вызвало настоятельную потребность в выключателях, в которых бы обеспечивался надежный разрыв дуги с помощью дополнительных дугогасительных средств. Одним из первых дугогасительных приспособлений, получивших широкое признание, стали рогообразные контакты, примененные первоначально в грозозащитных разрядниках. Массивные рога способствовали быстрой деионизации дугового промежутка. Выключатель с рогообразными контактами, запатентованный фирмой «Brown, Boveri & С0» в 1897 г. долго использовали в электротехнике. Для ускорения прерывания дуги стали применять также «магнитное дутье» искусственно создаваемым магнитным полем. Этот принцип дугогашения также был заимствован из практики грозозащиты — разрядники с магнитным гашением были предложены И. Томсоном и широко применялись в 90-е годы для защиты установок постоянного тока.

По мере роста мощности установок возникло новое затруднение: дуга, свободно поднимавшаяся по роговым электродам, распространялась на весьма значительные расстояния и угрожала безопасности расположенного вблизи оборудования. Предохранительное средство предложил М. О. Доливо-Добровольский: на пути дуги устанавливали поперечные перегородки из изоляционного материала. Дуга, изгибаясь вокруг нижних кромок пластин, удлинялась, сопротивление дугового промежутка возрастало, дуга быстрее деионизировалась.

В 1912 г. Доливо-Добровольский внес еще одно перспективное предложение: устанавливать на пути дуги решетку из металлических пластин — так называемую искрогасительную решетку. Это изобретение до настоящего времени широко используют во многих видах коммутационной аппаратуры: контакторах, рубильниках, разъединителях.

Однако выключатели с открытой дугой в воздухе не могли полностью решить задачу надежного отключения больших токов короткого замыкания. Поэтому параллельно с развитием этого вида аппаратов начиная с 50-х годов не прекращались попытки создать плавкие предохранители и выключатели с использованием высоких электроизоляционных свойств минеральных масел. Первые конструкции масляных предохранителей и выключателей, созданные И. Томсоном в Америке и С. Ферранти в Англии, представляли собой устройства, в которых контакты разрывались в воздухе с последующим отводом подвижного контакта под слой масла.

Следующим шагом в развитии масляных выключателей было разделение функции рабочих и дугогасительных контактов. В 1898 г. Ч. Броун разработал конструкцию, в которой на каждую фазу приходилось по два рабочих и по четыре дугогасительных контакта. Процесс гашения дуги в таком аппарате ускорился, а допустимая разрывная мощность значительно возросла благодаря ряду существенных особенностей: дугогасительные контакты, разбивая дугу на несколько коротких дуг, находились глубоко под слоем масла и быстро разводились сильными пружинами.

В 1898 г. подобного типа выключатели были построены в Америке инженером Э. М. Хьюлеттом. Они приближались к современным видам масляных выключателей, хотя первые конструкции не имели специальных дугогасительных камер. Гашение осуществлялось в результате увеличения расстояния между расходящимися контактами. Но это увеличение не могло быть беспредельным, и в то время как напряжения и мощности электрических установок продолжали повышаться, габариты выключателей и объем масла недопустимо возрастали. Возникла потребность в новых дугогася-щих средствах, первым из которых стало газомасляное дутье, создаваемое в специальных дугогасительных камерах. В 1908 г. американские инженеры Д. Хиллард и Ч. Парсонс построили масляный выключатель с гасительной камерой продольного дутья. В дальнейшем принцип газомасляного дутья прочно утвердился в выключателестроении.

В 90-е годы XIX в. и в начале XX в. появилось еще несколько принципиально новых устройств для разрыва дуги, таких, как водяные, трубчатые, автогазовые и, наконец, воздушные выключатели, но они не получили в первые два десятилетия XX в. сколько-нибудь широкого признания и практического применения.

В начальный период развития сильноточной техники представлялась более удобной передача электрического тока по проводам с помощью кабельных подземных ЛИНИЙ. Полагали, что подземная проводка обезопасит электрические сети от механических повреждений и атмосферных помех и не будет портить внешнего вида городов.

Начиная с 1880 г. предпринимаются попытки проложить силовые кабели, рассчитанные на напряжение до 200 В. Предварительный многолетний опыт эксплуатации телеграфных линий лег в основу построения первых сильноточных кабелей. В качестве изоляции использовали гуттаперчу и пропитанный джут. В 1882 г. Т. А. Эдисон разработал специальную конструкцию кабеля и кабельной муфты для сети первой центральной электрической станции в Нью-Йорке. В 1884 г. в Вене был проложен кабель с рабочим напряжением 2 кВ.

В конце 80-х и начале 90-х годов в кабельной технике произошли решающие изменения благодаря вводу нового вида изоляционного материала: пропитанной бумаги взамен джута. Бумажная изоляция позволила повысить напряжение силовых кабелей с 2 до 10 кВ. Для увеличения механической прочности и герметичности силовые кабели, так же как и кабели связи, стали покрывать свинцовой оболочкой. В 1908 г. появились первые трехжильные кабели на напряжение 20 кВ с поясной изоляцией и вязкой пропиткой. Такой кабель был проложен в Баку (работает до настоящего времени). В 1910 г. в Германии между Дессуа и Биттерфельдом впервые был проложен одножильный кабель на напряжение 60 кВ. Более широкое распространение силовых высоковольтных кабелей (на напряжение 35 кВ) началось лишь после окончания первой мировой войны.

Кабельная техника развивалась в тесном взаимодействии с научными исследованиями электрического поля. Разработкой теории электрического кабеля занимался русский физик П. Д. Войнаровский. В 1913 г. Хох-штедтер (Германия) на основе теоретических разработок предложил конструкцию кабеля с экранированными жилами. Экранирование жил позволило в 1918—1919 гг. начать изготовление трехжильных кабелей на напряжения до 60 кВ. Однако по мере роста электрических распределительных сетей преимущественное распространение получили более дешевые воздушные линии.

Изоляция воздушных линий электропередач вначале была целиком заимствована у телеграфных линий. Первоначально это были штыревые, стеклянные или фарфоровые колоколообразные изоляторы. На рубеже 80—90-х годов потребовалось усиление изоляции: специальную выемку в штыревых изоляторах заполняли маслом — так возникли фарфорово-масляные изоляторы. Эмпирически была определена их наиболее рациональная конструктивная форма — с длинными и тонкими фарфоровыми юбками типа «Дельта» (Германия). Этот изолятор мог быть использован для напряжений 60—70 кВ. Но в начале XX в. при строительстве высоковольтных трасс на одно из первых мест снова выдвинулась проблема линейной изоляции. Недостаточная механическая и электрическая прочность штыревых изоляторов ограничивала пропускную способность электропередач. Благоприятный выход нашел в 1906 г. Хьюлетт: он разработал конструкцию подвесных фарфоровых изоляторов, что позволило резко увеличить напряжение электропередач. В 1908—1912 гг. с применением подвесных изоляторов были сооружены первые линии на напряжение 110 кВ в США, а позднее и в Германии. Область применения штыревых изоляторов, как правило, стала ограничиваться 60 кВ и ниже.

Другое затруднение на пути введения высоких напряжений возникло в связи с явлением короны на высоковольтных проводах. Коронирование сопровождалось значительной потерей энергии. Первые попытки экспериментально определить потери энергии на корону были предприняты американским исследователем Ч. Скоттом в 1898 г. в линии электропередачи напряжением 20 кВ. Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования в 1910—1914 гг. проводили В. Ф. Миткевич в России,. Ф. Пик в Америке, Г. Капп в Англии. Результаты этих исследований показали, что уменьшить потери на корону можно, увеличив действительный,, или «электрический», диаметр провода. Этот вывод послужил основой для широкого распространения сталеалюминиевых и алюминиевых проводов, поскольку при равной проводимости диаметр этих проводов оказывался больше, чем медных. Использование алюминия было впервые предпринято в США на электрической установке Ниагары в конце 90-х годов прошлого столетия. К 1910 г. алюминиевые провода получили довольно широкое распространение.

В конце первого десятилетия XX в. стали применять медные провода с пеньковой основой — предвестники полых проводов, также используемых для уменьшения потерь на тихий разряд. Вывод о рациональности увеличения диаметра проводов привел В. Ф. Миткевича (1910 г.) к идее-расщепленных проводов, распространенных в современных электропередачах сверхвысоких напряжений.

Одновременно с сооружением первых электрических установок возникла проблема борьбы с перенапряжениями. Реальную опасность представляли перенапряжения, индуктируемые в воздушных проводах при близких грозовых разрядах. Исторически первыми средствами защиты от атмосферного электричества были приспособления, заимствованные из практики грозозащиты зданий и телеграфных линий связи: заземленные тросы, стержневые молниеотводы и снабженные плавкими вставками телеграфные громоотводы, являющиеся прототипом разрядников.

В 90-е-годы появилось много видов грозозащитных аппаратов, основанных на различных принципах действия: водоструйные заземлители, постепенно снижавшие перенапряжения электростатического происхождения; разрядники с искровым промежутком и принудительным гашением дуги, катушки самоиндукции, предложенные английским физиком О. Лоджем в качестве фильтров для импульсных токов молнии и др.

При конструировании разрядников наиболее сложная задача заключалась в надежном гашении дуги сопровождающего тока, величина которого стремительно росла вместе с повышением мощностей электрических станций. Много изобретательности и неудачных попыток ученых и инженеров различных стран было связано с созданием разрядников.

В 1891 г. И. Томсон предложил конструкцию с многократным разрывом дуги — принцип, нашедший полное признание лишь в 20—30-е годы XX в. при одновременном использовании в разрядниках токоограничивающих сопротивлений с вентильными свойствами.

Начиная с 1896 г. самым распространенным видом разрядника становится роговой громоотвод, предложенный немецким электротехником Э. Олыплегером. К 1900 г. он завоевал почти полную монополию в сетях напряжением до 10 кВ. Благодаря многочисленным усовершенствованиям роговых разрядников этот тип грозозащиты надолго удержался в европейских сетях напряжением до 50—60 кВ. Америка пошла по другому пути.

Начиная с 1907 г. там распространились алюминиевые разрядники, отвечающие требованиям работы сетей напряжением 100— 150 кВ. Разрядник не обладал безупречными характеристиками и надежностью действия и явился лишь временной защитной мерой (до начала 20-х годов).

В течение двух первых десятилетий XX в. не прекращались поиски иных средств защиты от перенапряжений, в том числе обследовалась эффективность грозозащитных тросов — теория тросовой защиты была выдвинута немецким ученым В. Петерсеном в 1914 г. Проверялись защитные свойства высоковольтных конденсаторов и катушек индуктивности. В целом защита от перенапряжений оставалась нерешенной проблемой. Предохранение от прямых ударов молнии считалось совершенно невозможным. Это объяснялось малой изученностью молнии и процессов распространения волн перенапряжений по проводам, а также быстрым моральным старением защитных средств, развитие которых не поспевало за стремительным ростом напряжений и мощностей электрических установок. Положение усугублялось тем, что в мощных сетях проявлялись коммутационные перенапряжения. Техника защиты пошла по ложному пути совмещения в одном аппарате функций защиты от атмосферных и от внутренних перенапряжений.

Средства защиты от сверхтоков также прошли длительный путь развития, прежде чем стать специальной отраслью — релейной защитой. Предохранение от токов коротких замыканий первоначально было довольно примитивным. До конца 90-х годов XIX в. практически единственным средством защиты электрооборудования от чрезмерно больших токов были плавкие предохранители. Это были надежные устройства, применявшиеся на напряжении до 6 кВ. Однако плавкие предохранители не могли обеспечить селективного отключения поврежденных участков сети, а также справиться с прерыванием больших токов в мощных сетях, ограничивая тем самым рост мощности электрических установок.

На смену плавким предохранителям пришли реле. Еще в 90-х годах стали применять сначала максимальные автоматические выключатели, а затем максимальные электромагнитные реле, которые настраивали на определенные значения тока. Превышения установленного тока при авариях вызывали срабатывание реле, подающего сигнал на отключение поврежденного участка.

Защита совершенствовалась. В начале 900-х годов появилось несколько типов реле: токовые, напряжения, направления мощности. Но пока вопросы правильного согласования значений тока, напряжения и выдержек времени были мало изучены и им не придавалось еще нужного значения, происходили частые неселективные срабатывания.

В первом и в начале второго десятилетия XX в. зародились новые направления релейной защиты: устройства, основанные на применении нелинейных элементов электрических цепей, и прежде всего насыщенных сталей. Так, в 1911 г. в Америке были применены быстронасыщающиеся трансформаторы, изменяющие соответствующим образом время срабатывания реле.

**Занятие 9. Развитие электрических сетей, ЛЭП разных напряжений, передач постоянного тока**

Одним из важнейших показателей уровня электроэнергетики страны является развитие электрических сетей — линий электропередачи и подстанций (ПС). От электростанций мощностью в несколько миллионов киловатт каждая протянулись на тысячу и более километров к промышленным центрам линии электропередачи сверхвысокого напряжения (СВН) — 500–750—1150 кВ.

Общая протяженность воздушных линий электропередачи (ВЛ) напряжением 110 кВ и выше на начало 2010 г. в одноцепном исчислении составила по стране 461,7 тыс. км, а установленная мощность ПС — 691,4 млн кВА, в том числе на отраслевых ПС, обеспечивающих электроснабжение тяговых ПС электрифицированных участков железных дорог, насосных и компрессорных станций нефте-и газопроводов, металлургических заводов и других потребителей электроэнергии, установлено около 100 млн кВА трансформаторной мощности.

Структура электрической сети и динамика ее роста за последние годы приведена в табл. 1.3. Столь огромное электросетевое хозяйство формировалось и развивалось в соответствии с потребностью народного хозяйства страны в течение многих десятилетий.

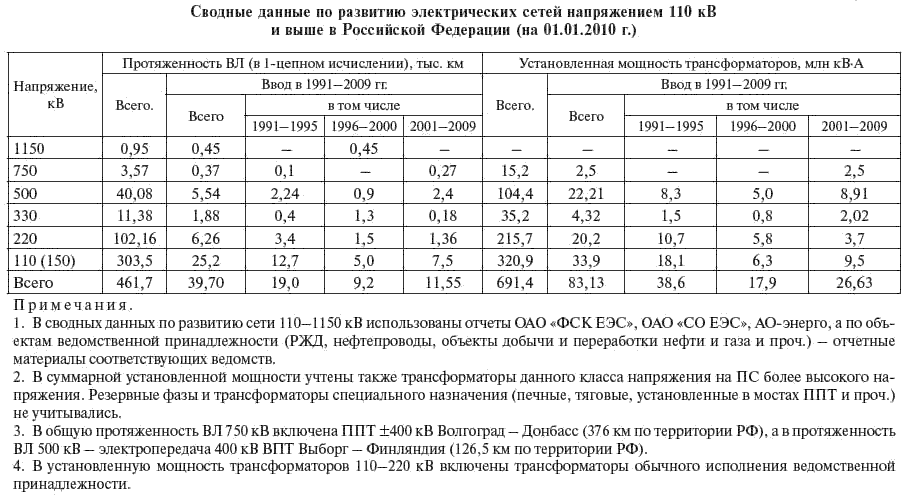
Первая ВЛ напряжением 110 кВ в России была построена в 1922 г. для передачи мощности от Каширской ГРЭС в Москву. С вводом в работу этой ВЛ было положено начало развитию электрической сети страны. Для обеспечения передачи мощности от Нижне-Свирской ГЭС в Ленинград в 1933 г. была введена в работу первая ВЛ 220 кВ. В современном понимании электрические сети начали развиваться высокими темпами только со второй половины 1950-х гг., что связано с завершением работ по восстановлению народного хозяйства после Великой Отечественной войны, устойчивым характером роста спроса на электроэнергию, развитием генерирующего комплекса электроэнергетики и формированием энергосистем.

В 1956 г. вошла в эксплуатацию первая ВЛ 400 кВ Куйбышевская ГЭС — Москва. С переводом первых электропередач 400 кВ на 500 кВ (1959 г.) был поставлен вопрос о введении промежуточного напряжения между 500 и 220 кВ. Таким напряжением явилось 330 кВ, а первая электропередача этого класса напряжения Прибалтийская ГРЭС — Рига была введена в работу в 1959 г.

При практической реализации рекомендаций по введению в действующую систему напряжений 110–220—500 кВ промежуточного напряжения — 330 кВ — в электрических сетях нашей страны стали параллельно развиваться две системы напряжений: 110-220-500-1150 кВ и 110-330-750 кВ.

В электрических сетях большинства энергосистем России принята шкала напряжений 110-220-500-1150 кВ. В ОЭС Северо-Запада и частично в ОЭС Центра используется шкала 110-330-750 кВ. В ОЭС Центра сети 330 и 750 кВ, а в ОЭС Северного Кавказа сети напряжением 330 кВ получили определенное распространение и в перспективе намечены к дальнейшему развитию, как правило, в пределах районов их существующего использования.

Граница использования указанных систем напряжений в ЕЭС России в течение последних 15 лет постепенно смещалась в восточном направлении. Указанное является следствием использования напряжений 750 и 330 кВ для выдачи мощности Калининской, Смоленской и Курской АЭС, расположенных в зоне стыка двух систем напряжений. Если на начало 1980 г. восточная граница распространения сетей 750 кВ лежала на линии Ленинград — Калинин — Брянск — Курск, то к концу 2000 г. линия разграничения систем напряжений проходила через Санкт-Петербург — Владимир — Михайлов — Курск, т. е. на 200–250 км восточнее.



Характерной особенностью отмеченного смещения сетей 750 кВ в восточном направлении является использование этого напряжения для выдачи мощности указанных выше АЭС. Как известно, одним из последствий аварии на Чернобыльской АЭС явился отказ от строительства новых АЭС и доведения до проектной мощности Калининской, Смоленской и Курской АЭС. В связи с этим строительство ряда ВЛ от Смоленской АЭС в габаритах 750 кВ, рассчитанных на использование полной пропускной способности с вводом в работу последующих энергоблоков АЭС, было остановлено, а авансированные капиталовложения оказались «замороженными». Поэтому в перспективный период дальнейшее развитие сетей 750 кВ и их возможное смещение в восточном направлении будет связано с продолжением строительства этих АЭС и доведением ряда действующих АЭС до проектной мощности.

Смещение сетей 330 кВ в восточном направлении за тот же период носит ограниченный характер, поскольку в прилегающих энергосистемах получила значительное развитие сеть напряжением 220 кВ.

В условиях использования двух различных систем номинальных напряжений схема сети в зонах стыковки обеих шкал развивается таким образом, чтобы свести к минимуму трансформации 220/330, 330/500 и 500/750 кВ.

По оценке на начало 2004 г. система 330–750 кВ обеспечивала передачу и распределение около 11 % всей мощности электростанций страны.

Основу транспортной системы ЕЭС России составляют электрические сети напряжением 500-750-1150 кВ. Общая протяженность ВЛ этих классов напряжений на начало 2010 г. составила 44,6 тыс. км, а установленная трансформаторная мощность ПС этих напряжений — около 119,6 млн кВА.

Электрические сети 500 кВ эксплуатируются во всех регионах страны и являются основными в ЕЭС России, выполняя системообразующие и межсистемные функции, выдачу мощности крупнейших электростанций (Балаковской АЭС, Сургутской ГРЭС, Саяно-Шушенской ГЭС и др.), электроснабжение крупных нагрузочных узлов сети 220 и 110 кВ и концентрированно расположенных потребителей нефтяной, газовой и металлургической промышленности (ПС БАЗ, Демьянская, Луговая, Липецкая и др.).

Общие показатели развития электрических сетей 500 кВ на начало 2010 г. характеризуются следующими данными:

протяженность — 40,18 тыс. км;

общая установленная мощность ПС — 104,4 млн кВА.

В 2007 г. введена Транссибирская магистраль 500 кВ Заря — Барабинск — Таврическая (730 км).

В последние годы выполнено строительство ряда ВЛ и ПС 500 кВ (Западная, Ключи, Емелино, Владивосток, Пересвет и др.), а так же заходы действующих ВЛ на новые ПС; осуществлен перевод на номинальное напряжение ранее построенных ВЛ (Ильково — Луговая, Холмогоры — Тарко-Сале); проведена реконструкция ряда крупных ПС 500 кВ (Бескудниково, Тюмень и др.). Наиболее крупные строящиеся ВЛ 500 кВ (на 1.01.2011 г.): Фроловская — Шахты — Ростов с ПС Ростовская (441 км, 2x501 МВА), Сургутская ГРЭС — ПС магистральная (157 км), Алюминиевая — Абакан-Итат (вторая цепь), Северная — БАЗ (199 км) и др.

Электрические сети 750 кВ используются в ОЭС Северо-Запада и частично в западной части ОЭС Центра.

Электропередачи 750 кВ используются как системообразующие, для выдачи мощности крупных электростанций, в первую очередь АЭС рассматриваемых регионов, питания мощных нагрузочных узлов 500 и 330 кВ, а также для связи ЕЭС России с энергосистемами Украины и Белоруссии.

Общее развитие электрических сетей 750 кВ на начало 2010 г. характеризуется следующими количественными показателями:

протяженность ВЛ, включая ППТ ± 400 кВ

Волгоград — Донбасс — 3,6 тыс. км;

количество ПС — 5;

установленная мощность автотрансформаторов (АТ) — 15,2 млн кВА.

В 2005 г. введена в работу ВЛ 750 кВ Калининская АЭС — ПС Белозерская (272 км) и ПС Белозерская 750/500 кВ, 2 ? 1251 МВА.

Электрическая сеть 1150 кВ России состоит из участков межсистемной электропередачи Сибирь — Казахстан — Урал, которые вводились в работу с середины 80-х гг. Основное назначение электропередачи было связано с передачей мощности и электроэнергии из Сибири и Казахстана в ОЭС Урала. С отделением энергосистемы Казахстана от ЕЭС России эту функцию электропередачи следует считать утраченной.

Общая протяженность ВЛ 1150 кВ по состоянию на начало 2010 г. составила 953 км. Действующие ПС 1150 кВ на территории России отсутствуют, сооруженные ВЛ эксплуатируются на напряжении 500 кВ. Строительство ВЛ 1150 кВ продолжается. Так, в последние годы закончено строительство ВЛ Итат — ПС Алтайская (448 км). Перевод указанной электропередачи на номинальное напряжение будет осуществлен в более поздние сроки.

В период до 2015 г. планируется начать строительство ВЛ 1150 кВ ПС Алтайская — Омск протяженностью 735 км.

В 1965 г. в нашей стране была введена в работу ППТ по воздушной биполярной линии Волгоград — Донбасс напряжением ±400 кВ.

Пропускная способность электропередачи — 720 МВт, протяженность линии — 473 км (по территории России — 376 км). Сечение полюса — 600 х 2, опоры металлические. ППТ Волгоград — Донбасс предназначена для работы в реверсивном режиме. Средняя точка четырехмостовой схемы заземлена наглухо, образуя две полуцепи «полюс — земля» биполярной передачи. Каждая из полуцепей может оставаться в работе при выведенной другой полуцепи в ремонт или по другой причине. В этом случае передача будет работать по униполярной схеме с возвратом тока через землю и со сниженной вдвое мощностью.

Трудности переходного периода в развитии экономики страны сказались на уровне спада промышленного потребления электроэнергии и, как следствие, на резком сокращении объемов электросетевого строительства всех напряжений. Так, среднегодовые вводы ВЛ 500, 220 и 110 кВ за последние 15 лет по России снизились в 3 раза.

Одной из основных причин роста повреждаемости ВЛ и оборудования ПС является значительный объем физически и морально устаревшего оборудования, находившегося в эксплуатации. Так, на начало 2010 года износ сетевого хозяйства ФСК ЕЭС в целом составил 50,6 %, в том числе подстанционного оборудования — 60 %, зданий и сооружений — 39 %. Около 40 % оборудования уже выработало свой нормативный ресурс.

На ПС напряжением 110–220 кВ со сроком службы более 50 лет требуют замены 8,5 млн кВА, из которых более половины подлежит восстановлению. Преодоление дефицита финансовых и материальных ресурсов для проведения реконструкции невозможно без привлечения крупномасштабных инвестиций. В этих условиях стратегия проведения работ по техперевооружению и реконструкции объектов электрических сетей должна учитывать финансовое положение РАО «ЕЭС России» и АО-энерго и строиться в ближайшие годы в направлении продления ресурса оборудования, применения восстановительных технологий. При замене оборудования на ПС рекомендуется ориентироваться на лучшие образцы оборудования, выпускаемого отечественными заводами. Использование оборудования производства иностранных фирм должно относиться к «приоритетным» объектам в случаях отсутствия аналогов в номенклатуре отечественных заводов.

Продление ресурса оборудования неминуемо скажется на увеличении объема работ по устранению физического и морального износа объектов электрических сетей в будущем.

Выдача мощности строящихся электростанций, внешнее электроснабжение новых потребителей, проведение реконструкции и технического перевооружения требуют весьма значительного объема электросетевого строительства. Так, в 2010 г. ОАО «ФСК ЕЭС» начало строительство 36 ПС и 40 ВЛ напряжением 110 кВ и выше общей установленной мощностью 7416 МВА протяженностью свыше 5 тыс. км. Затраты на реализацию всех направлений инвестиционной программы ФСК ЕЭС в 2010 г. составили более 170 млрд руб., а всего на период 2010–2012 гг. планируется более 520 млрд руб.

В 2000-е гг. продолжалось совершенствование организационной структуры электросетевого хозяйства страны. Постановлением Правительства РФ «О реформировании электроэнергетики Российской Федерации» ЕЭС России была признана «общенародным достоянием и гарантией энергетической безопасности» государства. Основной частью ЕЭС «является единая национальная энергетическая сеть, включающая в себя систему магистральных линий электропередачи, объединяющих большинство регионов страны, и представляющая собой один из элементов гарантии целостности государства». Для ее «сохранения и укрепления, обеспечения единства технологического управления и реализации государственной политики в электроэнергетике» было предусмотрено создание Федеральной сетевой компании (ФСК). В последующем постановлении Правительства РФ были утверждены критерии отнесения магистральных линий электропередачи и объектов электросетевого хозяйства к единой национальной (общероссийской) электрической сети (ЕНЭС).

Для реализации правительственной программы реформирования электроэнергетики в части электросетевого комплекса, относящегося к ЕНЭС, в ноябре 2001 г. Совет директоров ОАО РАО «ЕЭС России» определил этапы создания и основные нормы управления ФСК. В январе 2002 г. Совет директоров ОАО РАО «ЕЭС России» принял решение об учреждении ОАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» (ОАО «ФСК ЕЭС»). Решениями Совета Директоров было одобрено участие ОАО РАО «ЕЭС России» в качестве единого учредителя ОАО «ФСК ЕЭС» и утверждена кандидатура Председателя Правления ОАО «ФСК ЕЭС», утверждены размеры и стоимость имущества ОАО РАО «ЕЭС России», передаваемого в уставный капитал ОАО «ФСК ЕЭС», одобрена крупная сделка по внесению имущества в уставный капитал ОАО «ФСК ЕЭС». Согласно решениям Совета директоров ОАО РАО «ЕЭС России» уставный капитал ОАО «ФСК ЕЭС» составлял 127 млрд руб. В его оплату ОАО РАО «ЕЭС России» вносились денежные средства, а также электросетевой комплекс, принадлежавший ОАО РАО «ЕЭС России», который включал 140 ПС, линии электропередачи протяженностью более 44 тыс. км, производственные базы, системы технологического управления.

В июне 2002 г. состоялась официальная государственная регистрация новой компании — ОАО «ФСК ЕЭС», созданной как организация по управлению ЕНЭС с целью ее сохранения и развития. Основными направлениями деятельности ОАО «ФСК ЕЭС» являются:

управление ЕНЭС;

предоставление услуг субъектам оптового рынка электрической энергии по передаче электрической энергии и присоединению к электрической сети;

инвестиционная деятельность в сфере развития ЕНЭС;

поддержание в надлежащем состоянии электрических сетей;

технический надзор за состоянием сетевых объектов ЕЭС России.

К середине октября 2002 г. было завершено первичное формирование ОАО «ФСК ЕЭС». В конце 2003 г. по распоряжению Правительства РФ было создано и зарегистрировано семь (по числу ОЭС) межрегиональных магистральных сетевых компаний (ММСК): Северо-Запада, Центра, Юга, Волги, Урала, Сибири и Востока. В уставные капиталы ММСК переданы сетевые объекты и активы, принадлежавшие АО-энерго и относящиеся к ЕНЭС. Учредители ММСК выступили Российский фонд федерального имущества (85 %) и ОАО «ФСК ЕЭС» (15 %).

На начало 2010 г. формирование ММСК было практически завершено. Принята окончательная схема формирования ЕНЭС, предусматривающая одноэтапное присоединение ранее созданных магистральных сетевых компаний (МСК) к ОАО «ФСК ЕЭС».

ММСК являются компаниями, только владеющими магистральными сетями, но не осуществляющими функции эксплуатации и развития сетей. Последнее является прерогативой ОАО «ФСК ЕЭС».

В соответствии с Федеральным законом «Об электроэнергетике» по объектам, входящим в ЕНЭС, права собственников ограничиваются и передаются «ФСК ЕЭС» как организации, осуществляющей управление ЕНЭС. Концентрация управления всем магистральным сетевым комплексом страны в рамках ФСК ЕЭС создаст условия для обеспечения надежной работы в рыночных условиях, то есть возможность равного доступа к электрической сети, реализации единой стратегии и единых норм развития, нормальное функционирование рынка электроэнергии и проч. Функции и активы региональных диспетчерских управлений (РДУ) переданы общероссийскому системному оператору (ОАО «СО ЕЭС»).

Протяженность ВЛ по ММСК в процентах от общей длины ВЛ ОАО «ФСК ЕЭС» приведена на рис. 1.3.



К ЕНЭС относятся следующие магистральные линии электропередачи и объекты электросетевого хозяйства (Постановление Правительства РФ от 26 января 2006 г. № 41).

1. Линии электропередачи (воздушные и кабельные), проектный номинальный класс напряжения которых составляет 330 кВ и выше.

2. Линии электропередачи (воздушные и кабельные), проектный номинальный класс напряжения которых составляет 220 кВ:

обеспечивающие выдачу в сеть энергетической мощности электрических станций, общая установленная мощность каждой из которых составляет не менее 200 МВт;

обеспечивающие соединение и параллельную работу энергетических систем различных объектов Российской Федерации;

обеспечивающие выдачу энергетической мощности в узлы электрической нагрузки с присоединенной трансформаторной мощностью не менее 125 МВА;

непосредственно обеспечивающие соединение указанных линий электропередачи, включая магистральные линии электропередачи с подстанциями, внесенными в уставный фонд Российского открытого акционерного общества энергетики и электрификации «ЕЭС России».

3. Линии электропередачи, пересекающие государственную границу Российской Федерации.

4. Линии электропередачи (воздушные и кабельные), проектный номинальный класс напряжения которых составляет 110 (150) кВ и вывод из работы которых приводит к технологическим ограничениям перетока электрической энергии (мощности) по сетям более высокого класса напряжения.

5. Трансформаторные и иные подстанции, проектный номинальный класс напряжения которых составляет 220 кВ и выше, соединенные с линиями электропередачи, указанными в пунктах 1–3, а также технологическое оборудование, расположенное на их подстанциях, за исключением распределительных устройств электрических станций, входящих в имущественный комплекс генерирующих энергообъектов.

6. Оборудование распределительных устройств напряжением 110 (150) кВ и связанное с ним вспомогательное оборудование на трансформаторных и иных подстанциях, проектный номинальный класс напряжения которых составляет 110 (150) кВ, обеспечивающие транзитные перетоки электрической энергии по линиям электропередачи напряжением 110 (150) кВ, указанным в пункте 4.

7. Комплекс оборудования и производственно-технологических объектов, предназначенных для технического обслуживания и эксплуатации указанных объектов электросетевого хозяйства.

Важным направлением реформирования АО-энерго при их разделении по видам деятельности стало создание системы управления распределительным сетевым комплексом (сети напряжением 110 кВ и ниже).

Распоряжением Правительства России (декабрь 2007 г.) утверждена следующая конфигурация межрегиональных распределительных сетевых компаний (МРСК): создаются 8 региональных МРСК, а так же самостоятельные компании на базе Мосэнерго, Ленэнерго и Тюменьэнерго.

Централизация управления распределительным сетевым комплексом позволяет улучшить его управляемость, повышает инвестиционную привлекательность и капитализацию распределительных сетевых компаний.

Дальнейшее развитие в электроэнергетике страны получает энергорынок, который подразумевает сосуществование нескольких сегментов: долгосрочный сегмент мощности, оптовый рынок электроэнергии и рынок системных услуг (РСУ). Системные услуги предполагают действия генераторов электростанций, направленные на поддержание параметров ЕЭС (например, стабильной частоты в сети) и ее готовности к работе в аварийных условиях. Правила РСУ направлены на первичное и вторичное регулирование частоты, развитие систем противоаварийного управления. Исполнители на РСУ определяются конкурентным отбором по критерию минимальной цены.

**Занятие 10. Развитие кабельной техники**

На заре развития электроэнергетики многие конструкции и схемы заимствовались из области неэнергетических применений электричества. Особенно много дала в этом отношении телеграфная техника. В связи с развитием телеграфа родилась и получила начальное развитие кабельная техника.

В первые годы строительства силовых электросетей наиболее естественной казалась подземная проводка, которая лучше защищена от механических повреждений и не портит внешнего вида улиц.

Решающую роль в развитии кабельной техники сыграло применение пропитанной бумажной изоляции.

Недостатки кабелей с поясной изоляцией привели к созданию кабеля с экранированными жилами (1913 г.). Такие 3-х жильные кабели на напряжение, равное 60 кВ, начали изготовляться в 1918 - 1919 гг.

Другим вариантом 3-х жильного кабеля высокого напряжения является изобретенный в 1924 г. (СССР) кабель с отдельно освинцованными жилами. Он был более гибок и надежен в эксплуатации. Такой кабель на напряжение 33 кВ был проложен в 1924 г. в Ленинграде (Ленинградское кабельное кольцо).

Борьба за повышение напряжения на кабельных линиях привела к созданию маслонаполненных кабелей, изобретенных в 1919 г. и выпускавшихся с 1923 г. В СССР маслонаполненный кабель на напряжение в ПО кВ был проложен в 1931 г. вблизи г.Ленинграда.

В 1926 - 28 гг. стали появляться газонаполненные кабели, а затем с 1930 г. - маслостатические: три экранированные жилы находятся в стальной трубе, которая заполняется маслом под давлением 15 атмосфер.

Прогрессивным направлением в развитии кабельной техники явилось постепенное расширение перехода от свинцовых оболочек к более дешевым алюминиевым. В настоящее время уже более 80% силовых кабелей выпускается с алюминиевыми оболочками. Резко расширен выпуск кабелей с пластмассовой оболочкой.

В настоящее время кабельные линии прокладываются главным образом в городах и поселках городского типа и на территории промышленных предприятий, т.е. там, где это необходимо по технико-экономическим соображениям (высокая концентрация мощных нагрузок), а также по соображениям безопасности и эстетики.

Маслонаполненные кабели среднего давления (на напряжение 110-220 кВ) используются для глубоких вводов энергии в центры городов и крупных промышленных предприятий.

Кабель высокого давления (на напряжение ПО - 500 кВ) широко применяется для устройства переходов через водные пространства, а также на мощных ГЭС для передачи энергии от повышающих трансформаторов к открытым распределительным устройствам, размещенным на берегах рек.

Одной из важнейших задач, решаемых в настоящее время, являются разработка конструкций и освоение производства кабелей на напряжение 750 кВ (переменного тока) и 1500 кВ (постоянного тока).

Для электропередачи большой протяженности преимущественное применение получили воздушные линии.

Исторически сложилась основная схема передачи и распределения электрической энергии: от районной электростанции идут одна или несколько цепей линии электропередачи, затем от приемной подстанции - питающие провода, наконец, от трансформаторных пунктов снабжается энергией разветвленная местная сеть. Со временем появились различные модификации основной схемы электроснабжения : замыкании линий в кольцо; перенесение подстанций внутрь цехов промышленных предприятий и т.п.

Особенно удачным оказалось сооружение колец линий высокого напряжения вокруг крупных промышленных городов. Эти кольца играют роль сборных шин, на которые по рабочим линиям вливается энергия от районных электростанций.

Такое кольцо воздушных линий, в частности, создано вокруг Москвы. По его примеру строились кольца для некоторых зарубежных городов.

Широкое применение получил ввод линий высокого напряжения в центры промышленных городов - "глубокий ввод", что значительно снизило потери в электросети крупного города. Одним из первых в мировой практике был глубокий ввод линии Шатура - Москва (1925 г.), которая вошла в самый центр города, к Кремлю [1].

Известно, что основными элементами воздушных линий являются провода, изоляторы и опоры. Это так называемая механическая часть линий передачи вначале целиком была заимствована у телеграфных линий. Опоры выполнялись в виде деревянных столбов, провода были сначала стальными, а изоляторы - штыревыми (стеклянными, а затем фарфоровыми).

Постепенно в 80 - 90-х гг. прошлого столетия стальные провода стали вытесняться медными. Начавшееся в конце прошлого века производство электролитической меди позволило в несколько раз снизить ее стоимость, хотя и до сегодняшнего дня медь считается дефицитным и дорогостоящим материалом. В течение первых десятилетий XX века медь заняла место основного проводникового материала в электротехнике.

Новый этап в развитии механической части линии был связан с переходом к алюминиевым и сталеалюминиевым проводам (центральная стальная жила придает проводу необходимую механическую прочность).

С ростом напряжения изменялась конструкция изоляторов. Уже на рубеже 80 - 90 гг. XIX века применение простых штыревых колоколообразных изоляторов оказалось недостаточным. Для усиления изоляции на штыревых изоляторах стали делать кольцеобразный желоб, заполнявшийся маслом. Так возникли фарфоровые изоляторы. В 1898 г. в Германии получили распространение изоляторы с длинными и тонкими фарфоровыми юбками, названный штыревым изолятором типа "дельта". Он применяется для напряжения до 70 кВ. Позднее на основе теоретических исследований был разработан изолятор типа "фарадоид", поверхность которого очерчивалась по силовым линиям электрического поля.

Повысить напряжение электропередачи выше 60 - 70 кВ удалось после изобретения в 1906 г. подвесных изоляторов, получивших повсеместное распространение для напряжения 35 кВ.

Много внимания уделялось способам подвески проводов. Для уменьшения нагрузки на промежуточные опоры при обрыве провода были разработаны выпускающие зажимы (до войны). Для линий напряжением 330 - 500 кВ были использованы зажимы с ограниченной прочностью заделки, которые позволяют проводу при обрыве проскальзывать, но не выпускают его на землю.

Большое многообразие конструкций характерно для развития опор линий передач. До начала текущего столетия строились исключительно деревянные опоры с горизонтальными траверсами.

В СССР с первых лет электрификации широко применялись деревянные опоры. Были выполнены всесторонние исследования их механической прочности и разработаны весьма удачные конструкции деревянных опор. Основным типом опоры линий 110 и 35 кВ стала деревянная П-образная опора.

В СССР также как и в США, имели место попытки применения деревянных опор даже для линий 220 кВ. Тем не менее все же основным для линий 220 кВ и выше стало применение металлических опор [2].

Прогрессивным направлением в развитии конструкций опор явилось их изготовление из железобетона. В СССР первые железобетонные опоры были разработаны еще в 1933 г., но только в 50-х годах, когда получила большое развитие индустрия железобетонных изделий, этот тип опор стал весьма распространен.

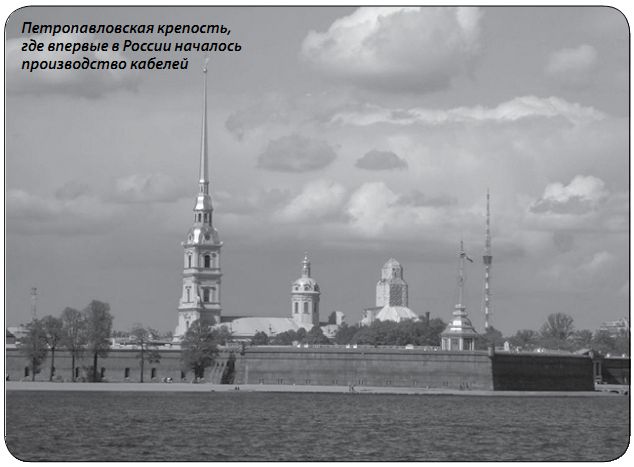
Датой основания кабельной промышленности в России считается 1879 год, однако первые кабели были созданы в нашей стране гораздо раньше. Еще в 1812 г. Павлом Львовичем Шиллингом фон Канштадтом был проведен эксперимент — взорвана на Неве мина, соединенная с электрическим источником двумя изолированными проводами. По сути, это и были первые отечественные кабели.



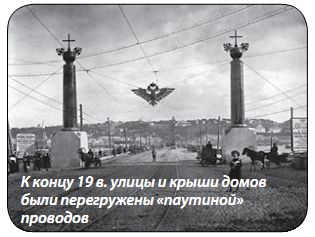
Шиллинг первым пришел к идее о пропитке изоляции влагонепроницаемым составом. В 1836 г. он создает экспериментальную телеграфную линию (ее проложили вокруг здания Адмиралтейства в Санкт-Петербурге), для которой использует двухжильный изолированный провод. Схожей научной работой занимается русский академик Борис Семенович Якоби.



В январе 1840 г. в Петропавловской крепости при лейб-гвардии саперном батальоне создается особая учебная команда, действовавшая в условиях секретности. Команда служила для «обучения гальванизму» гвардейских саперов, а также для «изготовления гальванических проводников». Таким образом, начало кабельного производства в России логичней соотнести с 1840 годом.



Однако изоляционные материалы того времени сравнительно быстро теряли свои свойства при прокладке кабелей в земле или воде. Это давало явное преимущество при использовании вместо кабельных воздушных проводных линий с голыми проводами, подвешенными на изоляторах. Вероятно, поэтому кабели не получили широкого распространения до второй половины XIX в., когда они стали важнейшим компонентом системы электроснабжения.



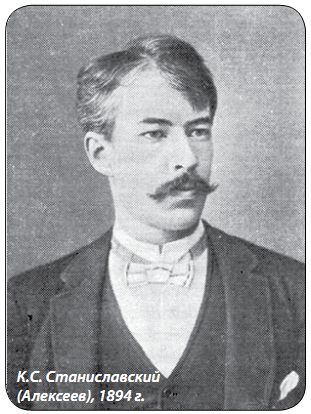
В 1885 г. в производство внедряется гидравлический пресс, позволивший накладывать на кабель свинцовую оболочку; в том же году начинают применять кабельную броню из стальных лент. Кроме того, интенсификация применения подземных кабелей к этому времени была вызвана и эстетическим подходом, так как улицы и крыши домов в крупных городах были перегружены «паутиной» телефонных, телеграфных и трамвайных проводов.

До конца 70-х годов XIX века Россия была крупным импортером кабельной продукции. Начало массового кабельного производства в России связано с крупной немецкой фирмой «Сименс и Гальске», основанной одним из пионеров электро-телеграфии и электрификации, основателем промышленного трамваестроения Вернером фон Сименсом и механиком Берлинского университета Иоганном Георгом Гальске. Первоначально фирма занималась прокладкой телеграфных линий — именно с этой областью связано начало деятельности фирмы в России. В 1851 г. она поставляет телеграфные аппараты для линии, протянувшейся из Финляндии через Петербург в Москву, в дальнейшем, в ходе Крымской войны — от Петербурга до осажденного Севастополя (небывалая по тем временам дальность телеграфной линии). Сотрудничество, оказавшееся весьма плодотворным, продолжилось, и в 1855 г. последовало открытие Петербургского отделения фирмы, до 60-х годов XIX века превосходившего по оборотам берлинскую контору. Возглавлял это отделение брат Вернера Сименса — Карл Генрих Сименс, долго живший в России и хорошо знавший русский язык (здесь его на русский манер называли Карлом Федоровичем).

Весной 1879 г. К. Сименс начинает строительство завода по производству кабелей в Санкт-Петербурге, на Васильевском острове. А вот разрешение на производство, так называемое «свидетельство на … изготовление изолированной проволоки и телеграфных кабелей» от канцелярии градоначальника столицы, было получено Сименсом лишь осенью того же года. Для транспортировки готовой продукции на берегу Финского залива была выстроена деревянная пристань. Так было создано предприятие, к началу ХХ в. получившее название «Соединенные кабельные заводы», а ныне именующееся завод «Севкабель».



Позже сформировалось еще несколько кабельных заводов. В 1883 г. предприниматель Гужон строит в Москве на Рогожской заставе мастерские, производившие проволоку в изоляции и без нее. В 1895 г. появляется завод «Товарищество для эксплоатации (так в документах. — Автор) электричества М. М. Подобедов и К°» (в наши дни завод «Москабельмет»), основанный инженером-технологом М.М. Подобедовым, членом Императорского Русского технического общества. В 1900 г. начинается кабельное производство на Кольчугинском латунном и меднопрокатном заводе (ныне завод «Электрокабель») и кустарное производство кабелей в Киеве, из которого вырос завод «Укркабель». В 1905 г. начинают производство кабелей заводы товарищества «Владимир Алексеев» и «П. Вишняков и А. Шамшин», прежде занимавшиеся производством «волоченного и плащеного золота и серебра» (то есть выпускавшие проволоку, «плющенку» (плоскую проволоку) и пряжу из драгоценных металлов для украшения мундиров военных и гражданских, а также платьев из золототканой вышивки). На основе этого производства позднее был организован московский завод «Электропровод». Руководил им К. С. Алексеев, более известный под фамилией-псевдонимом Станиславский как основатель МХТ (первоначально, кстати, он был построен как театр фабричный, при предприятии), актер, режиссер и великий теоретик театра. Его таланты управленца не уступали театральным.



В 1886 г. в Петербурге создается «Общество электрического освещения», которое заключает договоры с Санкт-Петербургской и Московской городскими управами «на прокладку подземных электрических проводов» (как в то время часто называли электрокабели). Кабельная промышленность решала и специальные задачи — завод АО «Соединенные кабельные заводы» участвовал в снаряжении второй Тихоокеанской эскадры вице-адмирала З.П. Рожественского перед отправкой на Тихий океан в ходе русско-японской войны. К примеру, оснащались кабелями (в том числе «кабелями для управления артогнем») крейсеры «Рюрик», «Варяг» и «Аврора» (да, та самая «Аврора», переживавшая тогда свою «корабельную молодость»).

К началу ХХ века кабель имел конструкцию, практически идентичную современной. Однако имелось много проблем. К примеру, заметное затухание сигнала в кабельной связи, вызванное использованием бумажной или каучуковой изоляции, создавало ограничения расстояний применения, и до первого десятилетия ХХ в. телефонная связь по кабельным линиям существовала лишь внутри городов. Междугородняя связь осуществлялась по этой причине только по воздушным линиям. Лишь в 1915 г. В.И. Коваленко, в будущем член-корреспондент АН СССР, создает усилитель, или, как говорили в то время, — «телефонную трансляцию».



В 1912 г. руководство кабельных заводов Российской Империи договорилось об объединении в синдикат, однако юридическое оформление произошло лишь в марте 1914 г. Синдикат занимался распределением заказов, исходя из мощности всех заводов, устанавливал цены на кабельную продукцию и кредитовал покупателей. Кроме упомянутых выше кабельных производств России в синдикат входил небольшой кабельный завод А. Н. Петичева, построенный в Петербурге. Расположенные там же мелкие мастерские Бетлинга, Малкиеля и Смита, производившие небольшое количество кабелей, не выдержали конкуренции и вскоре закрылись.

С началом первой мировой войны кабельная промышленность в России (как и другие отрасли) столкнулась с новыми проблемами. Дело в том, что большую часть используемого сырья предприятия привозили из-за рубежа, преимущественно из Германии. Вдобавок, значительная часть оборудования тоже была иностранного производства, зачастую германского (например, свинцовые прессы фирмы «Крупп»). Возникли и проблемы с добычей сырья на Кавказе: медные рудники Батумской области находились слишком близко от границы с Турцией, состоявшей в союзе с Германией. Лишь к 1915 г. некоторые из предприятий смогли наладить снабжение заводов сырьем отечественного и союзнического производства и запасными частями для импортного оборудования.

Существенную роль в кабельной промышленности в этот период играет продукция для действующей армии и военно-морского флота империи. К примеру, «Товарищество меднопрокатного и кабельного завода «Владимир Алексеев» и «П. Вишняков и А. Шамшин» в апреле 1915 г. ежедневно выдавало до 120 верст телефонного провода для военно-полевой связи, 4 версты саперного и 3 версты минного кабеля. Для ускорения снабжения действующей армии многие предприятия переходят на облегченные провода нового типа, где токоведущая жила скручивалась из четырех проволок (вместо семи). Однако объемов производства не хватало. Не следует также забывать, что в условиях мировой войны кабельные предприятия начинают выпускать дополнительную продукцию не по своему непосредственному профилю, которая прежде в России не производилась или производилась в крайне незначительных объемах, — автомобильные свечи европейского и американского образцов, артиллерийские пояски, электрические лампы и цоколи для них, а также эмалированную проволоку.

В том же году Главное военно-техническое управление обращается к кабельному синдикату с предложением создать крупнейший в России специализированный кабельный завод с ежегодным производством «300000 верст полевого телефонного проводника, 6000 верст полевого телеграфного, 10000 верст саперного проводника и 3000 верст минного кабеля». Местом создания завода был определен подмосковный город Подольск.



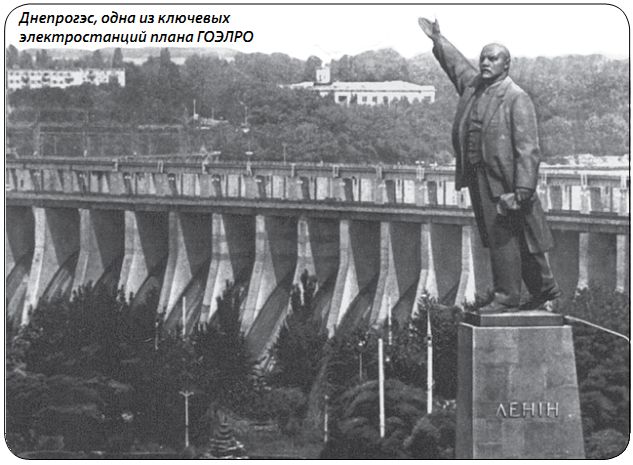
Строительство было начато с создания центральной электрической станции для снабжения будущего завода и частично города электроэнергией (таковы были условия Подольской управы, продавшей землю под производство), а также с проведения железнодорожных путей от станции Подольск по территории завода. К 1917 г. строительство было завершено, однако Октябрьская революция внесла свои коррективы, и расположенное в Подольске предприятие стало паровозоремонтным.

Завод АО «Объединенные кабельные заводы», как имевший в своем уставном капитале весомый процент германских средств, был реквизирован с началом войны.

Социальные волнения в России не обошли стороной и кабельных рабочих. Связано это было с плохими условиями труда: 12-часовой рабочий день, система штрафов за малейшую провинность, практически полное отсутствие техники безопасности. На производстве работали женщины и дети, несмотря на то, что по существовавшему тогда трудовому кодексу, считавшемуся одним из самых передовых в Европе, детям до 14 лет вообще запрещалось работать на заводе. Однако трудовое законодательство мало где исполнялось, поэтому рабочие-кабельщики принимали участие как в революции 1905—1907 гг., политических стачках и демонстрациях, так и в событиях Февраля и Октября 1917 года. На некоторых заводах создали красногвардейские отряды вооруженных рабочих.

В период революции 1917 г. и гражданской войны производство кабельной продукции в России резко сократилось. К примеру, простаивал построенный перед войной второй завод фабриканта Петичева в Воронеже, поэтому Главное артиллерийское управление планировало переоборудовать в 1918 г. его пустующее здание под арсенал.

Многие опытные рабочие и инженеры погибли на фронтах гражданской войны, умерли от болезней, оказались в эмиграции, сменили профессию. Облегчало положение то, что практически все кабельные предприятия, чья продукция была необходима в период гражданской войны, находились на особом контроле Советского правительства, их старались в первую очередь обеспечивать сырьем, материалами и топливом, а рабочих — продовольствием.  
В 20-х годах, когда был принят и начал реализовываться план электрификации страны, известный как план ГОЭЛРО, предусматривающий в том числе резкое увеличение производства кабелей и различных электротехнических приборов, началось интенсивное развитие кабельных заводов — они были национализированы еще в 1918 г. и переданы в ведение Высшего Совета Народного Хозяйства (ВСНХ). В итоге уже к концу первой пятилетки выпуск кабелей в стране вырос в 8 раз по сравнению с дореволюционным.



В эти же годы на заводе «Севкабель» под руководством С.М. Брагина и С.А. Яковлева были разработаны новые типы трехжильных кабелей, пригодные для работы с переменным током высокого напряжения (35 кВ). Затем главным инженером Д.В. Быковым было налажено производство маслонаполненного кабеля для переменного тока напряжением 110 кВ. Впервые он был применен при прокладке линии под Ленинградом, а несколько позднее — и под Москвой. На том же заводе развивалось производство газонаполненных кабелей и важных для развития промышленности эмалированных проводов. Совершенствовалось и развивалось оборудование, было автоматизировано наложение бумагомассной изоляции на жилы телефонных кабелей.

Учитывая, что два кабельных завода: завод им. Баскакова, названный так в честь рабочего, погибшего в октябре 1917 г. (ранее «Товарищество меднопрокатного и кабельного завода «Владимир Алексеев» и «П. Вишняков и А. Шамшин»), и завод «Русскабель» располагались в Москве, в 1924 г. ВСНХ принял решение об их объединении.

Предприятия были слиты 1 апреля 1924 г. в одно под названием «Московские объединенные кабельные заводы» (МОКЗ). Территориально заводы оставались на старых местах, но вместо двух вводилось одно заводоуправление. При этом для ускорения развития отрасли прокатно-проволочное производство, создание силовых кабелей и обмоточной меди планировалось сконцентрировать на бывшем «Русскабеле», а на втором предприятии — производить резиновые провода и телефонные кабели. Соответственно, оборудование согласно специализации перевозилось с одного завода на другой. В 1928 г. МОКЗ был переименован в «Электропровод».

В конце 20-х на заводе «Укркабель» наладили производство кабелей для угольных шахт. В 1938—1939 гг. их стал выпускать и завод «Электропровод». Там же было начато производство рентгеновских кабелей.



Согласно пятилетним планам, по которым тогда развивалась экономика страны, требовалось постоянное увеличение выпуска продукции. В 1930 г. для обеспечения заводов подготовленным инженерно-техническим персоналом создается московский Кабельный техникум, через год наладивший обучение без отрыва от производства. Для рабочих, техников, мастеров имелись различные курсы, кроме того Институт повышения квалификации при ВСНХ СССР, специализированный филиал Государственного электромеханического института, а также Всесоюзный электротехнический институт (ВЭИ). В последнем, кстати, работал незаурядный ученый П.А. Флоренский, имевший духовный сан. В институте он руководил отделом материаловедения и с 1926 по 1933 год подал в Комитет по изобретательству более 50 заявок (в том числе и по электроизолирующим материалам в кабельной промышленности), однако удовлетворены из них были лишь некоторые.

В те годы делается особый упор на создание собственной промышленности, основанной на использовании отечественного сырья и материалов, станков и машин. Для этого на заводах машиностроения создаются так называемые «ударные бригады импортной независимости», сами кабельные заводы переходят на режим экономии и оптимизации производства. К примеру, снижение содержания дорогого импортного каучука в резине для проводов низких напряжений сэкономило 15 тонн каучука в год, при этом качество кабеля не ухудшилось. Были введены технологии, позволяющие заменить остродефицитные материалы менее дефицитными: красной меди —железом, а свинца — целлюлозой.

В 30-е годы на Кольчугинском заводе открывается лаборатория по изучению резины, применяемой для оболочки и изоляции. Под руководством химика С.А. Коровкина в производство внедряется отечественный синтетический каучук.

На заводе в 1934—1940 гг. разработаны новые никелевые и медно-никелевые сплавы для жил кабелей, обладающие повышенным омическим сопротивлением, жаропрочностью и улучшенными электропроводящими характеристиками: алюмель, хромель, копель и манганин. Такие кабели и проволока из этих сплавов использовались при создании различной пирометрической аппаратуры и точных приборов.  
  
В 1932 г. в СССР создается первая отечественная освинцевальная машина, вводятся в строй обмоточные и оплеточные машины своего производства.

Завод «Москабель» после реконструкции в конце 30-х расширил производство и стал ведущим кабельным заводом СССР. Его цех силовых кабелей, открытый в 1939 г., был в то время крупнейшим в Европе.

На Кольчугинском заводе строится новый корпус — для производства полевых кабелей связи. Прежде входивший в состав завода им. С. Орджоникидзе (завода по обработке цветных металлов), Кольчугинский завод выделяется в 1939 г. в отдельное предприятие — «Электрокабель», с подчинением только что сформированному Главному управлению кабельной промышленности (Главкабель). Возглавил завод К.Ф. Сафонов, опытный управленец (как говорили тогда, «красный директор»), работавший до этого на Украине и в Москве.

В годы Великой Отечественной войны кабельные заводы выпускали продукцию, необходимую для фронта: как различные виды кабелей и проводов связи, так и военную продукцию, например, медные пояски для снарядов и запалы для минометов.

Оборудование было эвакуировано на Урал, в Сибирь и в Среднюю Азию. Были созданы новые заводы, например, «Уралкабель» в Свердловске (ныне Екатеринбург), «Томкабель» (ныне «Сибкабель») г. Томск, «Ташкенткабель» (Ташкент), «Ереванкабель» (Ереван).

Почти три четверти рабочих кабельных заводов ушли на фронт, были мобилизованы на оборонные работы. Вместе с шоферами заводов в распоряжение РККА передавался почти весь автотранспорт. К станкам встали женщины, подростки и пенсионеры. Завод «Севкабель», часть станков которого была эвакуирована на восток страны, продолжал работать и в блокадном Ленинграде, под бомбежками и артобстрелом врага. Производство остановилось лишь с 12 декабря 1941 по февраль 1942 года, во время самого тяжелого голода и прекращения выработки в городе электроэнергии.

Рабочие завода вместе со связистами Ленинградского фронта участвуют в прокладке двух кабелей по дну Ладожского озера. В 1941 году проложен кабель для связи между Ленинградом и «большой землей», а в 1942 — дублирующий кабель, для гарантии бесперебойной связи. Для обеспечения Ленинграда электричеством был проложен силовой кабель напряжением 10 кВ от Волховской ГЭС, который потом по аналогии со знаменитой «дорогой жизни» назвали «кабелем жизни».

После войны бурное развитие промышленности привело к появлению множества новых кабельных заводов, выпускавших разные типы продукции, например, Куйбышевский завод специализировался на выпуске кабелей связи, «Подольсккабель» — на выпуске проводов с пластмассовой изоляцией и т. д. Часто на новых заводах использовали трофейные немецкие станки, однако свои станкостроительные цеха были созданы еще в ходе войны почти на всех эвакуированных заводах.

Большую роль в создании и развитии новых заводов сыграл руководитель Главкабеля Михаил Федорович Еременко. Под его руководством и по его инициативе во время и после Великой Отечественной войны построено 30 кабельных заводов.

В 1948 г. созданы НИИ кабельной промышленности на основе научно-исследовательской лаборатории завода «Москабель» (впоследствии ВНИИКП), ставший единым центром всех кабельных разработок в нашей стране. Построенный им мощнейший производственный комплекс успешно освоил производство множества видов кабелей, необходимых промышленности, в первую очередь оборонной.

Перед кабельной промышленностью вставали новые задачи, в том числе создание термо- и радиационно-устойчивых кабелей с облученной изоляцией для атомных электростанций. Этим вопросом занимался директор ВНИИКП — Дмитрий Вениаминович Быков. В 1923 г. в возрасте 19 лет он закончил Электротехнический институт в Ленинграде, работал на заводе «Севкабель». В годы блокады Быков руководил техническими службами завода, являясь главным инженером. В 1951 г. он получил Государственную премию СССР.

В 1950 году в составе завода «Электропровод» было организовано ОКБ (особое конструкторское бюро), целью которого было обеспечение новыми видами кабельных изделий бурно развивающихся направлений техники — авиационной, судостроительной, радиоэлектронной, ракетно-космической.

Возглавил ОКБ Теодор Максович Орлович (в 2009 г. Т.М. Орловичу исполнилось 100 лет со дня рождения). Однако завод был загружен производством общепромышленной кабельной продукции и не мог выпускать спецпродукцию в необходимом объеме. Поэтому в 1956 году приказом министра электротехнической промышленности на базе ОКБ завода и артели «Кооппроводник» было создано самостоятельное ОКБ с собственным производством.

Через год ОКБ перебазировалось из тесных помещений артели в более удобное и просторное здание в подмосковных Мытищах. С марта 1958 года Особое конструкторское бюро кабельной промышленности (ОКБ КП) получило постоянное местожительство в этом городе. На предприятии разрабатывают и производят уникальные провода и кабели для работы в экстремальных условиях, в том числе на всех отечественных космических станциях МКС и по сей день.

В производство широко внедряются автоматические и полуавтоматические линии самого разного назначения (например, линии непрерывной вулканизации). В начале 1980-х годов на заводе «Одесскабель» в результате сотрудничества ВНИИКП и финской компании «Nokia» появилось первое в мире полностью автоматическое производство телефонного кабеля.

Инженерами Советского Союза успешно разрабатывались и применялись новые технологии, например производство сверхпроводящих кабелей. Первая в мире модель такого кабеля создана в 1980 г. ВНИИКП совместно с германской фирмой «Кабель-Метал-Электро».

В начале 1990-х годов кабельная промышленность сильно пострадала, количество выпускаемой продукции резко упало, однако впоследствии началось ее возрождение, чему во многом способствовало объединение основных производящих кабели предприятий СНГ в ассоциацию «Электрокабель» с общим научным центром ОАО «ВНИИКП». Помогало и сотрудничество с зарубежными производителями.

Основными тенденциями развития кабельного производства в СНГ сегодня являются переход к производству силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, прежде всего на среднее и высокое напряжения, усовершенствование волоконно-оптических кабелей, разработка и внедрение пожаробезопасных и огнестойких кабелей всех назначений. Осуществляются и другие работы по модернизации кабельной промышленности, особенно актуальные в связи с ужесточением конкуренции с зарубежными производителями в условиях мирового финансового кризиса.

25 октября 2009 года исполняется 130 лет со дня организации первого промышленного производства кабельной продукции — завода «Севкабель». Именно 25 октября 1879 года инженеру К. Сименсу (фирма «Сименс и Гальске») было выдано свидетельство на производство работ в построенном им заводе по изготовлению изолированной проволоки и телеграфных кабелей в городе Санкт-Петербурге (впоследствии завод «Севкабель»).

Общее собрание членов Ассоциации «Электрокабель» (октябрь 2007 г., № 48) приняло решение «проводить ежегодно 25 октября, начиная с 2008 года, корпоративный праздник «День работника кабельной промышленности».

**Занятие 11. Назначение распределительных сетей, конструкция и принцип построения**

Выбор схемы развития электрических сетей заключается в определении:

-схем выдачи мощности новых (расширяемых, реконструируемых) электростанций;

-пунктов размещения новых ПС, связей между ними (граф сети) и схем присоединения ПС к существующим и вновь сооружаемым сетям;

-объема реконструкции существующих линий и ПС, достигших физического или морального износа;

-количества и мощности трансформаторов на ПС;

-предварительных схем электрических соединений электростанций и ПС;

-типа, мощности и размещения компенсирующих и регулирующих устройств;

-сечений проводов (конструкций фазы) линий электропередачи;

-уровней токов КЗ и мероприятий по их ограничению; экономических показателей развития и функционирования сети.

На современном уровне, при высокой степени охвата обжитой территории страны сетями, речь идет, главным образом, об оптимизации развития существующей электрической сети, при которой необходимо исходить из общих принципов ее построения с учетом перспективы.

Выбор схемы электрических сетей выполняется, как правило, на следующие перспективные уровни:

-ЕНЭС — расчетный срок 10 лет;

-распределительная сеть — расчетный срок 5 лет;

-сеть внешнего электроснабжения промышленных предприятий, электрифицируемых участков железных дорог, перекачивающих станций магистральных нефтепроводов, газопроводов и продуктопроводов, выдачи мощности электростанций и т. п. — сроки ввода в работу (освоения мощности) объекта, с которым связано сооружение проектируемой сети.

Топология электрических сетей развивается в соответствии с географическими условиями, распределением нагрузок и размещением энергоисточников. Многообразие и несхожесть этих условий приводят к большому количеству конфигураций и схем электрической сети, обладающих разными свойствами и технико-экономическими показателями. Оптимальное решение может быть найдено путем технико-экономического сравнения вариантов (см. раздел 6).

Составление наиболее целесообразных вариантов схемы является достаточно сложной задачей, так как при большом количестве пунктов питания и узлов нагрузок количество возможных вариантов получается очень большим. Использование имеющихся компьютерных программ существенно облегчает решение задачи, хотя опыт и искусство проектировщика продолжают оставаться решающим фактором.

**Основные требования к схемам сети.**При проектировании схем электрических сетей должна обеспечиваться экономичность их развития и функционирования с учетом рационального сочетания сооружаемых элементов сети с действующими. В первую очередь необходимо рассматривать работоспособность действующих сетей при перспективном уровне электрических нагрузок с учетом физического и морального износа линий и ПС и их возможной реконструкции.

Развитие сети должно предусматриваться на основе целесообразности использования технически и экономически обоснованного минимума схемных решений, обеспечивающих построение сети из типовых унифицированных элементов в соответствии с нормативно-технической документацией по проектированию ПС и линий.

Схема электрической сети должна быть гибкой и обеспечивать сохранение принятых решений по ее развитию при возможных небольших отклонениях:

-уровней электрических нагрузок и балансов мощности от планируемых;

-трасс ВЛ и площадок ПС от намеченных;

-сроков ввода в работу отдельных энергообъектов.

На всех этапах развития сети следует предусматривать возможность ее преобразования с минимальными затратами для достижения конечных схем и параметров линий и ПС.

При проектировании развития сети рекомендуется предусматривать комплексное электроснабжение существующих и перспективных потребителей независимо от их ведомственной принадлежности и формы собственности. При этом рекомендуется учитывать нагрузки других потребителей, расположенных в рассматриваемом районе, а также намечаемых на рассматриваемую перспективу.

При проектировании развития системообразующей сети следует исходить из целесообразности многофункционального назначения вновь сооружаемых линий:

-увеличение пропускной способности сети для обеспечения устойчивой и надежной параллельной работы ОЭС;

-надежная выдача мощности электростанций;

-питание узлов нагрузки.

Рекомендуется избегать прямых связей между электростанциями (без промежуточных отборов мощности), для чего их необходимо прокладывать через крупные узлы нагрузки.

При проектировании развития электрических сетей необходимо обеспечивать снижение потерь электроэнергии до экономически обоснованного уровня.

Схема электрической сети должна допускать возможность эффективного применения современных устройств релейной защиты (РЗ), режимной и противоаварийной автоматики (ПА).

Построение электрической сети должно соответствовать требованиям охраны окружающей среды.

Схема должна обеспечивать оптимальный уровень токов КЗ, значения которых на шинах электростанций и ПС не должны превышать следующих:

https://www.wikireading.ru/img/276205_28_i_154.png

Для ограничения уровней токов КЗ следует предусматривать соответствующие схемные и режимные мероприятия.

Особо важным требованием к схеме является обеспечение необходимой надежности, под которой понимается способность выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в условиях, оговоренных в нормативных документах. Согласно ПУЭ все электроприемники по требуемой степени надежности разделены на три категории.

*Первая категория* — электроприемники, нарушение электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, угрозу безопасности государства, значительный материальный ущерб, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства, объектов связи и телевидения. Эти электроприемники должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых источников питания (таковыми, в частности, считаются две системы или две секции шин одной ПС, питающейся от двух источников), и перерыв в их электроснабжении может быть допущен только на время автоматического ввода резервного питания.

Из состава электроприемников первой категории выделяется особая группа электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов и пожаров. Для электроснабжения этой группы электроприемников должен предусматриваться третий (аварийный) независимый источник, мощность которого должна быть достаточна для безаварийного останова производства и который автоматически включается при исчезновении напряжения на основных источниках.

*Вторая категория* — электроприемники, перерыв электроснабжения которых связан с массовым недоотпуском продукции, простоем рабочих, механизмов и т. п. Эти электроприемники рекомендуется обеспечивать электроэнергией от двух независимых источников питания; при этом допустим перерыв электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания дежурным персоналом или выездной бригадой.

*Третья категория* — все остальные электроприемники. Электроснабжение этих электроприемников может выполняться от одного источника питания при условии, что перерывы электроснабжения, необходимые для ремонта или замены поврежденного элемента сети, не превышают 1 сутки.

При разработке схемы электроснабжения необходимо иметь в виду, что потребители электроэнергии, как правило, состоят из электроприемников, относящихся к различным категориям по требуемой степени надежности электроснабжения.

В соответствии с действующими нормативными документами схемы присоединения электростанций и ПС к системообразующей сети должны обеспечивать надежность питания энергоузлов и транзит мощности по принципу «N-1». В процессе реализации проектной схемы сети допускается неполное резервирование отдельного энергоузла с ограничением его максимальной нагрузки на время ремонта или замены основного оборудования на 25 %, но не более 400 МВт при внешнем электроснабжении на напряжении 750 кВ, 250 МВт — при 500 кВ, 150 МВт — при 330 кВ и 50 МВт — при 220 кВ (при условии обеспечения питания ответственных потребителей).

Схема и параметры электрической сети должны обеспечивать надежность электроснабжения, при которой в случае отключения любой линии или трансформатора сохраняется питание потребителей без ограничения нагрузки с соблюдением нормативного качества электроэнергии.

Помимо общих требований к надежности и пропускной способности системообразующих и распределительных сетей общего назначения регламентируются соответствующие требования к отдельным группам потребителей — промышленным предприятиям, тяговым подстанциям электрифицированных железных дорог, насосных и компрессорных станций магистральных трубопроводов и других потребителей (пп. 4.6–4.8). В нормативных документах конкретизированы требования по резервированию, количеству цепей и трансформаторов на ПС, схемам присоединения ПС к сети.

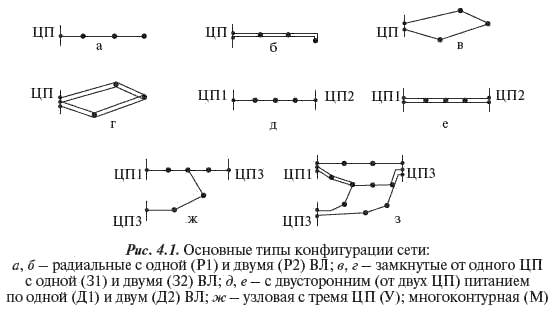
Если рассматриваемые варианты схемы существенно различаются по надежности электроснабжения, рекомендуется производить экономическую оценку ущерба от недоотпуска электроэнергии в соответствии с методикой, изложенной в п. 6.5. Учет ущерба от недоотпуска электроэнергии при выполнении технико-экономических расчетов по выбору схем электрических сетей рекомендуется также в следующих случаях:

-при расчетах пропускной способности системообразующих сетей по условиям взаиморезервирования;

-для определения относительной эффективности различных мероприятий, рекомендуемых для обеспечения требуемой надежности;

-при обосновании эффективности повышения уровней надежности (степени резервирования) сверх нормативных требований.

**Типы конфигурации электрических сетей и их применение.**Общепринятая классификация электрических сетей по их конфигурации отсутствует. Однако, несмотря на многообразие применяемых конфигураций и схем, любую сеть можно расчленить на отдельные участки, опирающиеся на ЦП, и отнести к одному из рассмотренных ниже типов (рис. 4.1).



*Одинарная радиальная сеть* (далее, для сокращения, тип Р1, рис. 4.1, *а)* является наиболее дешевой, но обеспечивает наименьшую надежность; получила широкое распространение как первый этап развития сети — при небольших нагрузках присоединенных ПС и возможности их резервирования по сети среднего (СН)[4] или низшего напряжения (НН). При этом для правильного проектирования сети уже на первом этапе следует решить, в каком направлении намечается дальнейшее развитие сети, чтобы привести ее к одному из типов по рис. 4.1, б, в или г.

*Двойная радиальная сеть* (тип Р2, рис. 4.1, *б*) за счет дублирования линии (на одних или разных опорах) обеспечивает резервирование питания потребителей. Эта схема характеризуется равномерной загрузкой обеих ВЛ, что соответствует минимуму потерь, не вызывает увеличения токов КЗ в смежных участках сети, позволяет осуществлять четкое ведение режимов работы сети, обеспечивает возможность присоединения ПС по простейшим схемам.

При электроснабжении района от одного ЦП находят применение также *замкнутые сети кольцевой конфигурации* одинарные (тип З1, рис. 4.1, в) и двойные (тип З2, рис. 4.1, г). Достоинствами этих схем, как и радиальных, являются независимость потокораспределения от перетоков в сети высшего напряжения (ВН), отсутствие влияния на уровень токов КЗ в прилегающих сетях, возможность применения простых схем присоединения ПС.

Широкое применение находит *замкнутая одинарная сеть,* опирающаяся на два ЦП (тип Д1, рис. 4.1, д). Эта конфигурация образуется в результате поэтапного развития сети между двумя ЦП. Преимуществами такой конфигурации являются возможность охвата территории сетями, создание шин между двумя ЦП для присоединения по мере необходимости новых ПС, уменьшение суммарной длины ВЛ по сравнению с присоединением каждой ПС «по кратчайшему пути» (что приводит к созданию сложнозамкнутой сети), возможность присоединения ПС по упрощенным схемам. Недостатками конфигурации Д1 являются большая вероятность неэкономичного потокораспределения при параллельной работе сетей разных напряжений и повышение уровней токов КЗ, вызывающее необходимость секционирования в нормальных режимах.

Модификацией конфигурации Д1 является *замкнутая двойная сеть,* опирающаяся на два ЦП (тип Д2, рис. 4.1, е). Применяется при более высоких плотностях нагрузок, обладает практически теми же преимуществами и недостатками, что и конфигурация Д1.

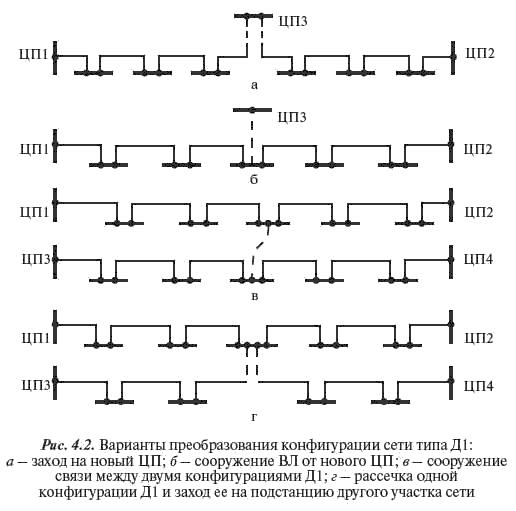
*Узловая сеть* (тип У, рис. 4.1, ж) имеет более высокую надежность, чем Д1 и Д2, за счет присоединения к трем ЦП, однако плохо управляема в режимном отношении и требует сооружения сложной узловой ПС. Создание такой сети, как правило, бывает вынужденным — при возникновении технических ограничений для дальнейшего использования сети типа Д1.

*Многоконтурная сеть* (тип М, рис 4.1, з) является, как правило, результатом неуправляемого развития сети в условиях ограниченного количества и неравномерного размещения ЦП. Характеризуется сложными схемами присоединения ПС, трудностями обеспечения оптимального режима, повышенными уровнями токов КЗ.

Основой рационального построения сети является применение простых типов конфигураций и использование в качестве коммутационных пунктов, главным образом, ПС следующей ступени напряжения, являющихся ЦП для проектируемой сети.

Для распределительной сети такими конфигурациями являются в первую очередь двойная радиальная сеть (Р2) и одинарная замкнутая, опирающаяся на два ЦП (Д1). Технико-экономические исследования и анализ области применения этих конфигураций показывают, что применение конфигурации типа Р2 (как правило, на двухцепных опорах) эффективнее при небольших расстояниях от потребителей до ЦП и при высоких уровнях нагрузок. Этот тип сети находит применение для электроснабжения промпредприятий и отдельных районов городов на напряжении 110 кВ (см. пп. 4.5 и 4.8).

Конфигурация Д1 находит широкое применение в сетях 110 кВ для электрификации потребителей сельской местности, а также в распределительных сетях 220 кВ, обеспечивая с наименьшими затратами максимальный охват территории. Техническими ограничениями для конфигурации Д1 являются пропускная способность головных участков, которая должна обеспечивать электроснабжение всех присоединенных ПС в послеаварийном режиме при выходе одного из них, а также предельное количество присоединенных ПС (см. п. 4.4). При возникновении технических ограничений для дальнейшего использования сети типа Д1 она может быть преобразована одним из способов, указанных на рис. 4.2. Схема рис. 4.2, *а* является предпочтительной, так как не усложняет конфигурацию сети, однако возможность ее применения обусловлена благоприятным размещением нового ЦП относительно рассматриваемой сети; схемы рис. 4.2, *б-г* приводят к созданию узловых (У) и многоконтурных (М) конфигураций и усложнению схем отдельных ПС; схемы рис. 4.2, *в* и г применяются в тех случаях, когда сооружение нового ЦП оказывается нецелесообразным.



Конфигурация типа Д2 обладает большой пропускной способностью и может использоваться длительное время без преобразования в другие типы. Она применяется в сетях 110 кВ систем электроснабжения городов, а также в сетях 110–220 кВ для электроснабжения протяженных потребителей — электрифицируемых железных дорог и трубопроводов.

Замкнутые конфигурации, опирающиеся на один ЦП (З1 и З2), используются, как правило, на первом этапе развития сети: первые — в сельской местности с последующим преобразованием в два участка типа Д1, вторые — в городах с последующим преобразованием в два участка типа Д2.

Применение сложнозамкнутых конфигураций распределительной сети (типов У, М) из-за присущих им недостатков (см. выше) нежелательно, однако в условиях развивающейся сети избежать их не удается. По мере появления новых ЦП следует стремиться к упрощению многоконтурной сети; при этом новые ЦП целесообразно размещать в ее узловых точках.

Системообразующие сети характеризуются меньшим многообразием типов конфигурации. Здесь, как правило, применяются конфигурации Д1 и У. При этом в качестве узловых точек используются распредустройства электростанций и часть ПС сети. Конфигурация системообразующей сети усложняется тем больше, чем длительнее она развивается в качестве сети высшего класса напряжения; после «наложения» сети следующего класса напряжения начинается процесс упрощения конфигурации сети низшего напряжения.

**Занятие 12. Ограничение потерь и показатели качества электроэнергии**

Качество электроэнергии, поставляемое в наши дома, не всегда является удовлетворительным. Мы часто говорим: «напряжение просело», «напряжение прыгает», «скачки напряжения», «плохое напряжение». Давайте разберемся вместе с этими понятиями. Следует отметить сразу, что точные определения отклонений от норм качества электроэнергии очень сложные. В рамках одной статьи невозможно дать полное описание требований к параметрам электричества и способам проведения официальных измерений. Тексты соответствующих ГОСТов и стандартов занимают десятки страниц и содержат многочисленные сложные формулы проведения расчётов. В данной статье мы дадим лишь общее понимание основных требований к качеству электроэнергии и простые описания часто встречающихся отклонений

Основные показатели качества электроэнергии

**Список основных показателей качества электрической энергии:**

-установившееся отклонение напряжения;

-размах изменения напряжения;

-доза фликера;

-коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;

-коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения;

-коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;

-коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности;

-отклонение частоты;

-длительность провала напряжения;

-импульсное напряжение;

-коэффициент временного перенапряжения.

**Отклонение напряжения**

Одним из параметров **качества электроэнергии** является **отклонение напряжения**.

Отклонение напряжения определяется значением установившегося отклонения напряжения. Для значения отклонения напряжения установлены нижеследующие нормы:  
нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения на выводах приемников электроэнергии равны соответственно +5 и +10% от номинального напряжения электрической сети.

Значение отклонения напряжения определяется при длительности процесса более одной минуты. **Нормально допустимым отклонением** напряжения считается диапазон в 5%, то есть: +/-5% (от 209 В до 231  В). **Предельно допустимым отклонением** напряжения считается диапазон в 10%, то есть: +/-10% (от 198 В до 242 В).

Для определенных выше показателей качества электроэнергии действуют следующие нормативы: положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10% номинального или согласованного значения напряжения в течение 100% времени интервала в одну неделю.



Колебание напряжения

Одним из параметров качества электроэнергии является колебание напряжения.

**Колебания напряжения характеризуются следующими показателями:**

-размахом изменения напряжения;

-дозой фликера.

Значения колебания напряжения имеют те же самые нормы, что и отклонение напряжения с единственным отличием: длительность процесса менее одной минуты. **Нормально допустимым колебанием** напряжения считается диапазон в 5%, то есть: +/-5% (от 209 В до 231  В). **Предельно допустимым колебанием** напряжения считается диапазон в 10%, то есть: +/-10% (от 198 В до 242 В).



**Замечание:** не следует путать требования ГОСТа к качеству электроэнергии в сети (ГОСТ Р 54149-2010 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная») и ГОСТов, описывающих качество электропитания для электрических приборов (напр. ГОСТ Р 52161.2.17-2009 «Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов»). ГОСТ качества электроэнергии предъявляет требования по сути к поставщику электрической энергии, и именно на этот ГОСТ можно опереться, если нужно предъявить требования к поставщику при плохом электроснабжении. А требования к качеству электропитания в паспортах приборов определяют требование к приборам работать нормально в более широком диапазоне значений параметров тока. Для приборов, как правило, закладывается диапазон по напряжению от -15% до +10% от номинального.

**Провал напряжения**

Одним из параметров качества электроэнергии является провал напряжения. Провал напряжения определяется показателем времени провала напряжения.

**Предельно допустимое значение** длительности провала напряжения в электросетях напряжением до 20 000 В включительно равно 30 секунд. Длительность автоматически устраняемого провала напряжения в любой точке присоединения к электрическим сетям определяется выдержками времени релейной защиты и временем срабатывания автоматики.

Провал напряжения определяется, когда напряжение падает до значения 0,9U и характеризуется длительностью процесса. Предельно допустимая длительность — 30 секунд. Глубина провала иногда может доходить и до 100%.



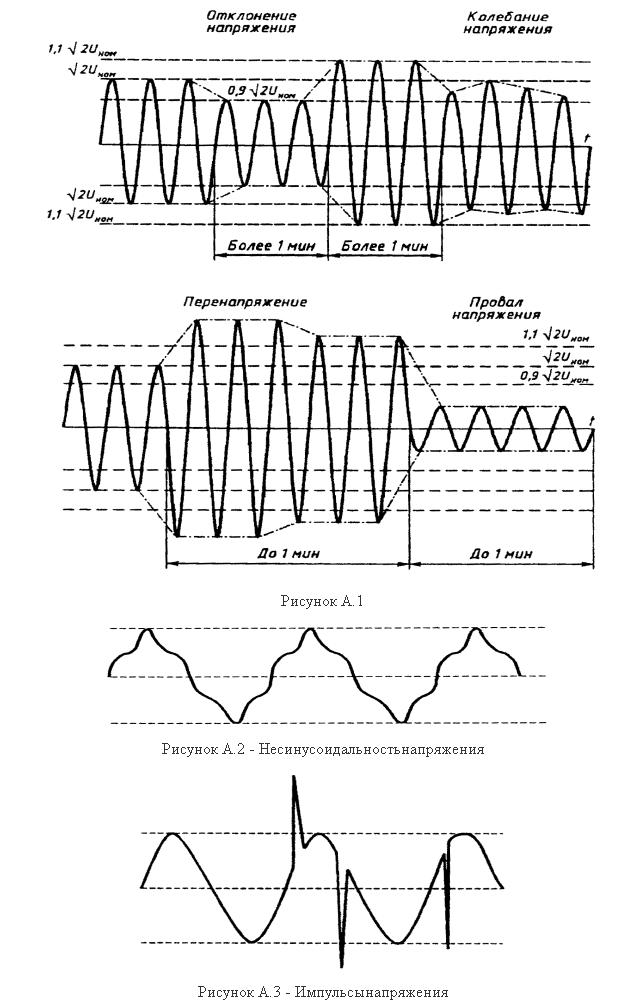
**Перенапряжение**

**Временное перенапряжение определяется показателем коэффициента временного перенапряжения.**

Перенапряжение характеризуется амплитудным значением напряжения больше 342 В. Верхний предел значения напряжения ГОСТом не определяется. Длительность временного перенапряжения — менее 1 секунды



Для определения качества электрической энергии можно использовать следующие графические изображения. На приведенных ниже рисунках отображены следующие отклонения параметров качества электроэнергии: отклонение напряжения, колебание напряжения, перенапряжение, провал напряжения, нарушение синусоидальности напряжения, импульсы напряжения.



Как улучшить качество электроэнергии

В случае существенных отклонений **параметров качества электроэнергии** следует прежде всего обратиться в обслуживающую организацию, к поставщику электрической энергии. Если административные действия по улучшению качества электроэнергии не дадут результатов, тогда необходимо использовать специальные средства защиты.

**Занятие 13. Исследования в области причин и последствий грозовых и коммутационных перенапряжений**

**Перенапряжение**- это напряжение, превышающее амплитуду наибольшего рабочего напряжения (Uном) на изоляции элементов электрической сети. В зависимости от места приложения различаются перенапряжения фазные, междуфазные, внутриобмоточные и междуконтактные. Последние возникают при приложении напряжения между разомкнутыми контактами одноименных фаз коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей).

Различают следующие характеристики перенапряжений:

-максимальное значение Umax или кратность K = Umax/Uном;

-длительность воздействия;

-форму кривой;

-широту охвата элементов сети.

Эти характеристики подвержены статистическому разбросу, так как зависят от множества факторов.

При технико-экономическом обосновании мер защиты от перенапряжений и выборе изоляции необходимо учитывать и статистические характеристики ущерба (математическое ожидание и дисперсию) вследствие простоя и внеочередного ремонта оборудования энергосистемы, а также вследствие порчи оборудования, брака продукции, нарушения технологического процесса у потребителей электроэнергии.

Основные виды перенапряжений в сетях высокого напряжения приведены на рисунке 1.

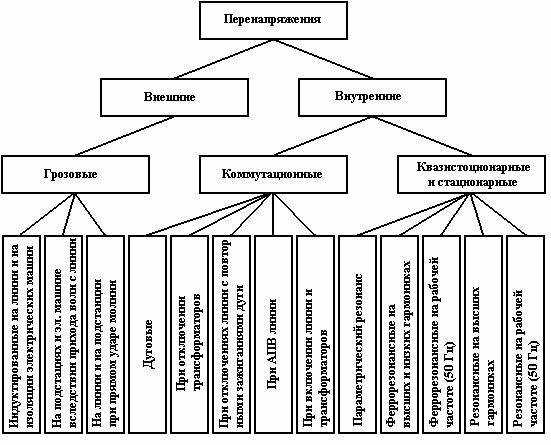


Рис. 1. Основные виды перенапряжений в сетях высокого напряжения

**Внутренние перенапряжения** вызываются колебаниями электромагнитной энергии, запасенной в элементах электрической цепи или поступающей в нее от генераторов. В зависимости от условий возникновения и возможной длительности воздействия на изоляцию различают стационарные, квазистационарные и коммутационные перенапряжения.

**Коммутационные перенапряжения** - возникают при внезапных изменениях в схеме или параметров сети (плановые и аварийные переключения линий, трансформаторов и т.д.), а также в результате замыканий на землю и между фазами. При включении элементов электрической сети (проводов линии или обмоток трансформаторов и реакторов) или отключении (разрыв электропередачи) возникают колебательные переходные процессы, которые могут привести к возникновению значительных перенапряжений. При возникновении короны потери оказывают демпфирующее действие на первые максимумы этих перенапряжений.

Отключение емкостных токов электрических цепей может сопровождаться повторными зажиганиями дуги в выключателе и многократными переходными процессами и перенапряжениями, а отключение малых индуктивных токов холостого хода трансформаторов - принудительным обрывом дуги в выключателе и колебательным переходом энергии магнитного поля трансформатора в энергию электрического поля его параллельных емкостей. При дуговых замыканиях на землю в сети с изолированной нейтралью также наблюдаются многократные зажигания дуги и возникновение соответствующих дуговых перенапряжений.



Главной причиной возникновения квазистационарных перенапряжений является емкостный эффект, обусловленный, например, односторонне питаемой от генераторов линией передач.

Несимметричные режимы линий возникающие, например, при замыкании одной фазы на землю, обрыве провода, отказе одной или двух фаз выключателя, могут привести к дополнительному повышению напряжения основной частоты или явиться причиной перенапряжений на какой-нибудь высшей гармонической - кратной частоте э.д.с. генератора.

Источником высших или низших гармонических и соответствующих феррорезонансных перенапряжений, может явиться также какой - либо элемент системы с нелинейными характеристиками, например, трансформатор с насыщенным магнитопроводом. При наличии источника механической энергии, периодически изменяющего параметр цепи (индуктивность генератора) в такт с частотой собственных колебаний электрической цепи, может возникнуть параметрический резонанс.

В некоторых случаях необходимо учитывать также возможность возникновения внутренних перенапряжений повышенной кратности при наложении нескольких коммутаций или других неблагоприятных факторов.

Для ограничения коммутационных перенапряжений в сетях 330-750 кВ, где стоимость изоляции оказывается особенно существенной, применяют мощные [вентильные разрядники](http://electricalschool.info/main/visokovoltny/474-ventilnye-razrjadniki-princip.html) или реакторы. В сетях более низких классов напряжения для ограничения внутренних перенапряжений разрядники не применяются, а характеристики грозозащитных разрядников выбирают так, чтобы они не срабатывали при внутренних перенапряжениях.



**Грозовые перенапряжения** относятся к внешним перенапряжениям и возникают при воздействии внешних э.д.с. Наибольшие грозовые перенапряжения возникают при прямом ударе молнии в линию и подстанцию. Вследствие электромагнитной индукции близкий удар молнии создает индуктированное перенапряжение, которое обычно приводит к дополнительному увеличению напряжения на изоляции. Дойдя до подстанции или электрической машины, распространяющиеся от места поражения [электромагнитные волны](http://electricalschool.info/spravochnik/electroteh/1874-jelektromagnitnye-volny.html), могут вызвать опасные перенапряжения на их изоляции.

Для обеспечения надежной работы сети необходимо осуществить ее эффективную и экономичную грозозащиту. Защита от прямых ударов молнии осуществляется с помощью высоких вертикальных стержневых молниеотводов и грозозащитных тросов над проводами ВЛ свыше 110 кВ.

Защита от волн, приходящих с линии, осуществляется вентильными и трубчатыми разрядниками на подстанциях усиленной грозозащитой подходов к подстанциям линий всех классов напряжений. Необходимо обеспечивать особо надежную грозозащиту вращающихся машин с помощью специальных разрядников, конденсаторов, реакторов, кабельных вставок и усиленной грозозащитой подхода воздушной линии.

Применение заземления нейтрали сети через дугогасящую катушку, АПВ и резервирования линий, тщательная профилактика изоляции, разрядников и заземления значительно повышают надежность работы линий.

Необходимо отметить, что электрическая прочность изоляции уменьшается при увеличении длительности воздействия напряжения. В связи с этим одинаковые по амплитуде внутренние и внешние перенапряжения представляют неодинаковую опасность для изоляции. Таким образом, уровень изоляции нельзя характеризовать одной величиной выдерживаемого напряжения.

**Выбор необходимого уровня изоляции**, т.е. выбор испытательных напряжений, так называемая **координация изоляции**, невозможен без тщательного анализа возникающих в системе перенапряжений.

Проблема координации изоляции является одной из главных проблем. Такое положение связано с тем, что использование того или иного номинального напряжения определяется, в конечном счете, соотношением между затратами на изоляцию и на токопроводящие элементы в системе.

Проблема координации изоляции включает в себя как основную задачу -**установление уровней изоляции системы**. Координация изоляции должна основываться на заданных амплитудах и формах волн воздействующих перенапряжений.

В настоящее время координация изоляции в системе до 220 кВ проводится по атмосферным перенапряжениям, а свыше 220 кВ координация должна проводится с учетом внутренних перенапряжений.

Сущность координации изоляции по атмосферным перенапряжениям заключается в координации (согласовании) импульсных характеристик изоляции с характеристиками вентильных разрядников, как основного аппарата по ограничению атмосферных перенапряжений. В соответствии с исследованиями принята стандартная волна испытательного напряжения.



При координации по внутренним перенапряжениям, в силу большего многообразия форм развития внутренних перенапряжений, нельзя ориентироваться на применение одного защитного устройства. Необходимая, краткость должна обеспечиваться схемой сети: шунтирующих реакторов, применением выключателей без повторных зажиганий, применением специальных разрядников.

Для внутренних перенапряжений до последнего времени еще не была проведена нормализация волн для испытания изоляции. В настоящее время накоплен большой материал, и соответствующая нормализация испытательных волн будет вероятно проведена в ближайшем будущем.

**Занятие 14. Исследования в области причин и последствий перегрузок и коротких замыканий**

Короткие замыкания в электропроводке чаще всего происходят из-за нарушения изоляции токопроводящих частей в результате механического повреждения, старения, воздействия влаги и агрессивных сред, а также неправильных действий людей. При возникновении короткого замыкания возрастает сила тока, а количество выделяющейся теплоты, как известно, пропорционально квадрату тока. Так, если при коротком замыкании ток увеличится в 20 раз, то выделяющееся при этом количество тепла возрастет примерно в 400 раз.

Тепловое воздействие на изоляцию проводов резко снижает ее механические и диэлектрические свойства. Например, если проводимость электрокартона (как изоляционного материала) при 20 °С принять за единицу, то при температурах 30, 40 и 50 °С она увеличится в 4, 13 и 37 раз соответственно. Тепловое старение изоляции наиболее часто возникает из-за перегрузки электросетей токами, превышающими длительно допустимые для данного вида и сечений проводников. Например, для кабелей с бумажной изоляцией срок их службы может быть определен по известному «восьмиградусному правилу»: превышение температуры на каждые 8 °С сокращает срок службы изоляции в 2 раза. Тепловому разрушению подвержены и полимерные изоляционные материалы.

Воздействие влаги и агрессивных сред на изоляцию проводов существенно ухудшает ее состояние из-за появления поверхностных токов утечки. От возникающего при этом тепла жидкость испаряется, а на изоляции остаются следы соли. При прекращении испарения ток утечки исчезает. При неоднократном воздействии влаги процесс повторяется, но из-за повышения концентрации соли проводимость увеличивается настолько, что ток утечки не прекращается даже после окончания испарения. Кроме того, появляются мельчайшие искры. В дальнейшем под действием тока утечки изоляция обугливается, теряет прочность, что может привести к возникновению местного дугового поверхностного разряда, способного воспламенить изоляцию.

Пожарная опасность коротких замыканий электропроводов характеризуется следующими возможными проявлениями электрического тока: воспламенением изоляции проводов и окружающих горючих предметов и веществ; способностью изоляции проводов распространять горение при поджигании ее от посторонних источников зажигания; образованием при коротком замыкании расплавленных частиц металла, поджигающих окружающие горючие материалы (скорость разлета расплавленных частиц металла может достигать 11 м/с, а их температура — 2050—2700 °С).

При перегрузке электропроводок также возникает аварийный режим. Из-за неправильного выбора, включения или повреждения потребителей суммарный ток, проходящий в проводах, превышает номинальное значение, т. е. происходит повышение плотности тока (перегрузка). Например, при прохождении тока в 40 А через последовательно соединенные три куска провода одинаковой длины, но различного сечения — 10; 4 и 1 мм2 плотность его будет различна: 4, 10 и 40 А/мм2. В последнем куске самая высокая плотность тока, и соответственно, самые высокие потери мощности. Провод сечением 10 мм2 слегка нагреется, температура провода сечением 4 мм2 достигнет допустимой, а изоляция провода сечением 1 мм2 просто сгорит.

Чем ток короткого замыкания отличается от тока перегрузки

Основное отличие короткого замыкания от перегрузки заключается в том, что при коротком замыканиинарушение изоляции является причиной аварийного режима, а при перегрузке — его следствием. При определенных обстоятельствах перегрузка проводов и кабелей в связи с большей длительностью аварийного режима более пожароопасна, чем короткое замыкание.

Материал жилы проводов оказывает существенное влияние на зажигающую способность при перегрузках. Сравнение показателей пожарной опасности проводов марок АПВ и ПВ, полученных при испытаниях в режиме перегрузки, показывает, что вероятность воспламенения изоляции в проводах с медными токопроводящими жилами выше, чем у алюминиевых.

При коротком замыкании наблюдается та же закономерность. Прожигающая способность дуговых разрядов в цепях с медными токопроводящими жилами более высокая, чем с жилами из алюминия. Например, стальная труба с толщиной стенки 2,8 мм прожигается (или воспламеняется горючий материал на ее поверхности) при сечении жилы из алюминия 16 мм2, а с медной жилой — при сечении 6 мм2.

Кратность тока определяется отношением тока короткого замыкания или перегрузки к длительно допустимому току для данного сечения проводника.

Наибольшей пожарной опасностью обладают провода и кабели с полиэтиленовой оболочкой, а также полиэтиленовые трубы при прокладке в них проводов и кабелей. Электропроводки в полиэтиленовых трубах в пожарном отношении представляют большую опасность, чем электропроводки в винипластовых трубах, поэтому область применения полиэтиленовых труб значительно уже. Особенно опасна перегрузка в частных жилых домах, где, как правило, от одной сети питаются все потребители, а аппараты защиты нередко отсутствуют или рассчитаны только на ток короткого замыкания. В многоэтажных жилых домах также ничто не препятствует жильцам пользоваться более мощными лампами или включать бытовые электроприборы общей мощностью большей, чем та, на которую рассчитана сеть.

На электроустановочных устройствах (розетках, выключателях, патронах и т. д.) указаны предельные значения токов, напряжений, мощности, а на зажимах, разъемах и других изделиях, кроме того, наибольшие сечения присоединяемых проводников. Для безопасного пользования этими устройствами необходимо уметь расшифровывать эти надписи.

Например, на выключателе нанесено «6,3 А; 250 В», на патроне — «4 А; 250 В; 300 Вт», а на удлинителе-разветвителе — «250 В; 6,3 А», «220 В. 1300 Вт», «127 В, 700 Вт». «6,3 А» предупреждает о том, что ток, проходящий через выключатель, не должен превышать 6,3 А, иначе выключатель перегреется. Для любого меньшего тока выключатель годится, так как чем меньше ток, тем меньше нагревается контакт. Надпись «250 В» указывает, что выключатель может применяться в сетях напряжением не выше 250 В.

Если умножить 4 А на 250 В, то получится 1000, а не 300 Вт. Как связать вычисленное значение с надписью? Надо исходить из мощности. При напряжении в сети 220 В допустимый ток: 1,3 А (300:220); при напряжении 127 В — 2,3 А (300—127). Току 4 А соответствует напряжение 75 В (300:4). Надпись «250 В; 6,3 А» указывает, что устройство предназначено для сетей напряжением не более 250 В и для тока не более 6,3 А. Умножая 6,3 А на 220 В, получаем 1386 Вт (округленно 1300 Вт). Умножая 6,3 А на 127 В, получаем 799 Вт (округленно 700 Вт). Возникает вопрос: не опасно ли так округлять? Не опасно, так как после округления получились меньшие значения мощности. Если мощность меньше, то меньше нагреваются контакты.

При протекании через контактное соединение электрического токаиз-за переходного сопротивления на контактном соединении падает напряжение, мощность и выделяется энергия, которая вызывает нагрев контактов. Чрезмерное увеличение тока в цепи или возрастание сопротивления ведет к дальнейшему повышению температуры контакта и подводящих проводов, что может вызвать пожар.

В электроустановках применяются неразъемные контактные соединения (пайка, сварка) и разъемные (на винтах, втычные, пружинящие и т. п.), а также контакты коммутационных устройств — магнитных пускателей, реле, выключателей и других аппаратов, специально предназначенных для замыкания и размыкания электрических цепей, т. е. для их коммутации. В сетях внутридомового электроснабжения от ввода до приемника электроэнергииэлектрический ток нагрузки протекает через большое количество контактных соединений.

Контактные соединения никогда, ни при каких обстоятельствах не должны нарушаться. Однако исследования проведенные некоторое время назад над оборудованием внутридомовых сетей, показали, что из всех обследованных контактов только 50 % удовлетворяют требованиям ГОСТа. При протекании тока нагрузки в некачественном контактном соединении за единицу времени выделяется значительное количество тепла, пропорциональное квадрату тока (плотности тока) и сопротивлению точек действительного соприкосновения контакта.

Если разогретые контакты будут соприкасаться с горючими материалами, то возможно их воспламенение или обугливание и загорание изоляции проводов.

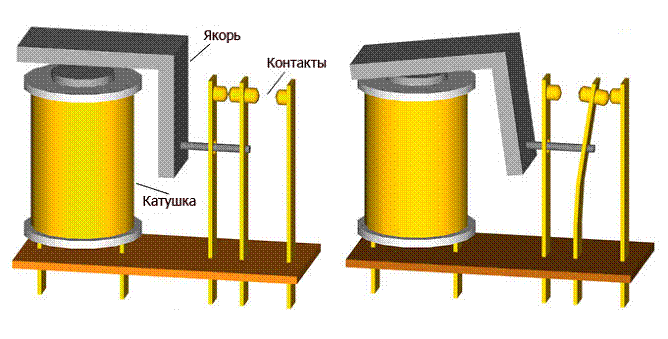
Величина переходного сопротивления контактов зависит от плотности тока, силы сжатия контактов (величины площади сопротивления), от материала, из которого они изготовлены, степени окисления контактных поверхностей и т. д.

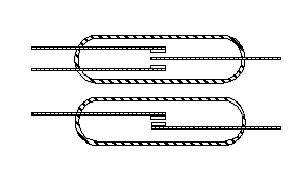
Для уменьшения плотности тока в контакте (а значит, и температуры) необходимо увеличить площадь действительного соприкосновения контактов. Если контактные плоскости прижать друг к другу с некоторой силой, мелкие бугорки в местах касания будут незначительно смяты. Из-за этого увеличатся размеры соприкасающихся элементарных площадок и появятся дополнительные площадки касания, а плотность тока, переходное сопротивление и нагрев контакта снизятся. Экспериментальные исследования показали, что между сопротивлением контакта и величиной крутящего момента (силой сжатия) существует обратно пропорциональная зависимость. С уменьшением крутящего момента в 2 раза сопротивление контактного соединения провода АПВ сечением 4 мм2 или двух проводов сечением 2,5 мм2 увеличивается в 4—5 раз.

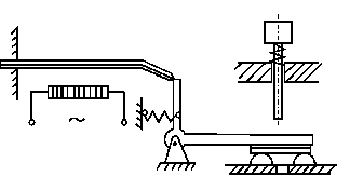
Для отвода тепла от контактов и рассеивания его в окружающую среду изготавливают контакты определенной массы и поверхности охлаждения. Особое внимание уделяют местам соединения проводов и подключения их к контактам вводных устройств электроприемников. На съемных концах проводов применяют наконечники различной формы и специальные зажимы. Надежность контакта обеспечивается обычными шайбами, пружинящими и с бортиками. Через 3—3,5 года сопротивление контакта увеличивается примерно в 2 раза. Значительно увеличивается сопротивление контактов и при коротком замыкании в результате краткого периодического воздействия тока на контакт. Испытания показали, что наибольшую стабильность при воздействии неблагоприятных факторов имеют контактные соединения с упругими пружинящими шайбами.

**Занятие 15. Развитие техники релейной защиты и автоматики**

Свое название релейная защита получила от названия основного элемента схем защиты – реле. Историки утверждают, что реле впервые было разработано и построено русским ученым Павлом Шиллингомв 1830 -1832 гг. Это реле составляло основную часть вызывного устройства в разработанном им телеграфе. Позже этот электрический аппарат получил название *реле*, от французского *relais*, что означало смену уставших почтовых лошадей на станциях или передачу эстафеты спортсменом.  
Первоначально электромеханическое реле представляло собой металлический сердечник (в виде бруска, стержня или подковообразной формы), на который намотано некоторое число витков провода. Неподалеку от торца металлического сердечника располагался *якорь*,- подвижный элемент с металлической накладкой (Рис. 1). При подаче в катушку постоянного тока, возникающее магнитное поле притягивает якорь к сердечнику катушки. Если якорь механически связать с контактной группой так, чтобы при притягивании якоря контакты замыкались или размыкались, получится *коммутирующие реле*. Такое реле называют сегодня *реле тока*.  
В широком смысле реле - это любой аппарат, дискретно изменяющий свое состояние в зависимости от значения какой-то внешней, измеряемой величины. Нередко реле получает свое название в зависимости от контролируемого параметра. Так например *тепловое реле*, выполненное на основе биметаллической пластины в зависимости от температуры изменяет состояние своих электрических контактов (Рис. 3).  
В отрасли релейной защиты термином реле обычно обозначают автоматически действующее устройство, производящее скачкообразное изменение (релейное действие) в управляющей системе при заданном изменении контролируемых параметров. Так, например, *реле максимального тока* при увеличении тока в контролируемой цепи (куда включена токовая обмотка этого реле) до заданного значения, называемого *током срабатывания*, замыкает своими контактами управляемую цепь. В релейной защите применяются *реле тока* и *напряжения*, *тепловое реле*, *реле сопротивления*, *индукционное реле* и другие. Широкое применение реле в начале XX столетия связано с развитием электрических систем. В 1901 г. появляется первое многофункциональное реле типа RI, и именно это время следует связывать с зарождением релейной защиты в России. В эти же годы появляются индукционные токовые реле. Появление в России зарубежного энергетического оборудования потребовало создания специальных служб, связанных с обеспечением надежной работы устройств релейной защиты. До октября 1917 года эти службы в основном возглавлялись представителями фирм-поставщиков основного энергетического оборудования: ASEA, Siemens и др. Впервые в России наиболее солидным предприятием, занявшимся теоретическими и практическими вопросами релейной защиты, стала лаборатория имени А.Л. Смурова в Ленинграде. Эту лабораторию возглавил Виктор Иванович Иванов. Помимо релейной защиты реле применяется и в других технических областях: автоматике, телемеханике, телеграфии, телефонии и т.д. В последнее время широкое распространение получают полупроводниковые коммутационные приборы, такие как тиристоры, симисторы, транзисторы. Они позволяют производить бесконтактную коммутацию цепи, возможна работа с большими токами и напряжением. К преимуществам полупроводниковых устройств также следует отнести быстродействие и отсутствие механических частей. Однако следует отметить, что полупроводниковые приборы не смогут окончательно заменить электромеханическое реле. Это связано с тем, что в ряде случаев от коммутирующего аппарата требуется так называемый «видимый разрыв», это определяется требованиями к безопасности персонала. Также при наладке устройств защиты часто требуется механически произвести коммутацию, удерживать реле в замкнутом или разомкнутом состоянии независимо от управляющего воздействия. Перечисленные требования проблематично обеспечить в полупроводниковых устройствах.

  
**Рис. 1** - принцип действия электромеханического реле;

  
**Рис. 2** - конструкция геркона (реле магнитного поля);

  
**Рис. 3** - конструкция температурного реле;

В 1888 г. выдающийся русский электротехник Михаил Осипович Доливо-Добровольский, которому принадлежит много работ и изобретений в разных областях электротехники, изобрел систему трехфазного тока. Вскоре под его руководством впервые в мире была осуществлена передача электрической энергии токами высокого напряжения (15 кВ) на большое расстояние. Это было важным событием в истории электроэнергетики, и системы трехфазного тока вскоре получили широчайшее применение. Однако их эксплуатация, как и других электрических систем, невозможна без защит от электрических повреждений, наиболее опасным из которых является КЗ.  
В электрической системе КЗ обычно сопровождаются резким возрастанием тока. Поэтому первыми появились токовые защиты, действующие в случае, когда ток в защищаемом элементе превышает заранее установленное значение. Первоначально токовые защиты выполнялись с использованием плавких предохранителей, которые и до этого использовались для защиты электрических установок еще с конца 19 века.  
Но недостатки плавких предохранителей очевидны: это их одноразовость и также недостаточная точность определения предельного тока. И в скором времени плавкие предохранители в ряде случаев перестали удовлетворять своему назначению, вместо них повсеместно стали использоваться электромагнитные реле. Первые попытки использования реле для защиты от коротких замыканий относятся к началу 1890-х годов, когда появились электроустановки с первичными электромагнитными реле тока прямого действия, установленными непосредственно на выключателях. Широкое применение для защиты реле получают, однако, только с первых десятилетий 20 столетия в связи с развитием электрических систем. С 1901 г. появляются индукционные реле тока, построенные на базе индукционных измерительных механизмов, предложенных и разработанных также М.О. Доливо-Добровольским. Тогда шведской фирмой ASEA было разработано индукционное дисковое реле типа RJ которое в практически неизменной форме с успехом используется и сейчас.

В 1905-1908 г.г. разрабатываются дифференциальные токовые защиты, основанные на сравнении токов на разных участках защищаемой линии (Рис. 5). С 1910 начинают применяться токовые направленные защиты; к этому же времени относятся попытки выполнения дистанционных реле (реле сопротивления), завершившиеся выпуском в начале 20-х годов созданием дистанционных защит.

В 1923-1928 г.г. предпринимаются первые шаги по использованию для релейной защиты токов высокой частоты, передаваемых по проводам защищаемых линий.

К 20-тым годам двадцатого века относится также выпуск первых обобщающих публикаций по релейной защите, выполняемой на электромеханической элементной базе. К ним, в частности, относится книга под редакцией немецкого электротехника Р. Рюденберга, перевод которой на русский язык был выпущен в 1930 г. В 30-х годах была опубликована на ту же тему более глубокая по содержанию книга под редакцией М. Шлейхера, написанная с участием Нейгебауера.

К рассматриваемому периоду относится также появление оригинальных обобщающих трудов советских авторов по вопросам защиты, первым из которых является монография В.Л. Иванова "Реле и релейная защита". Эта весьма ценная работа, не потерявшая значения и по настоящее время.

В 1934 г. были опубликованы результаты разработок на электронных лампах реле различного назначения. В эти же годы в Советском Союзе была разработана на электронных лампах дистанционная защита. Однако на практике она распространения не получила; единственным, вероятно, исключением было многолетние использование ламповых приемопередатчиков в каналах для передачи высокочастотных сигналов по проводам защищаемых линий для осуществления быстродействующих защит.

Более перспективным оказалось применение полупроводников (медно-закисных и селеновых выпрямителей), начатое также еще в 30-е годы для выполнения реле, работающих на выпрямленных токах. Дальнейшее развитие это направление получило в конце 40-х годов, когда стало возможным применение германиевых, кремниевых диодов и транзисторов. В последующие годы в Советском Союзе и за рубежом разрабатывались и выполнялись с использованием полупроводников как отдельные бесконтактные реле и устройства, так и защиты в целом. Опыт выполнения и эксплуатации таких защит несмотря на ряд возникающих трудностей оказался безусловно положительным. Однако надежды, возлагавшиеся на полупроводниковые защиты по потребляемым мощностям и связанным с ними чувствительностям, оправдались не полностью. Выявилась также их относительно невысокая надежность, обусловленная недостаточной стабильностью параметров и наличием весьма большого количества внешних соединений между отдельными функциональными элементами защиты.

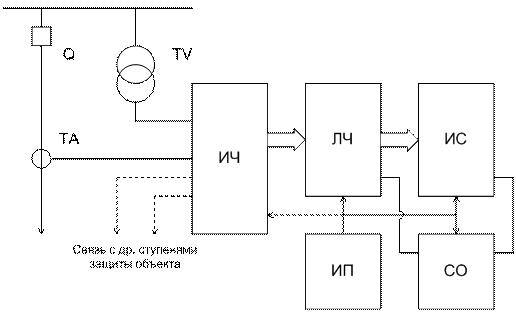
Положение с применением для защиты полупроводниковой элементной базы существенно изменилось в 60-е годы после разработки и начавшегося внедрения в разные области интегральной микроэлектроники со все возрастающей степенью интеграции, когда в одном кристалле удается "упаковывать" очень большое число элементов: резисторов, конденсаторов, диодов и т.д.). Поэтому в настоящее время как у нас, так и за рубежом разработаны и начинают широко внедряться защиты, использующие микроэлектронную элементную базу.

В довоенное время основными научно-исследовательскими центрами СССР в области техники релейной защиты были: лаборатория высоких напряжений имени проф. А.А. Смурова (в Ленинграде) и в Москве отдел СРЗ и крупнейшие энергетические системы Союза - Мосэнерго, Ленэнерго, Уралэнерго и др.

Ими был накоплен обширный экспериментальный материал, разработаны новые конструкции и типы защит, достигнуты большие успехи в области методов расчета защитных устройств и электрических величин при повреждениях, накоплен большой опыт проектирования и эксплуатации релейной защиты.

До последнего времени многие устройства релейной защиты, серийно выпускавшиеся отечественной промышленностью, выполнялись с использованием электромеханических реле электромагнитного и индукционного типов. Защиты с такими реле, как показывает опыт, удовлетворяют ряду обычно предъявляемых требований. Однако они обладают двумя практически весьма существенными недостатками - большими габаритами и значительными потреблениями мощности от измерительных трансформаторов. Поэтому рядом отечественных организаций проводились работы по выявлению технических возможностей и эффективности широкого использования других принципов для осуществления отдельных реле и защит в целом. Большое внимание было при этом уделено вопросам расширения использования электроники.

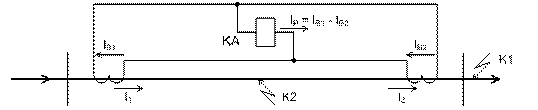
Первые работы по применению электроники относятся к 20-м годам, когда как указывалось выше, были предложены высокочастотные защиты линий. В 1934 г. были опубликованы результаты разработок с использованием электронных ламп непосредственно для осуществления реле различного назначения [3]. В те же 30-е годы в Советском Союзе с электронными лампами была разработана дистанционная защита.

   
Рис. 4 - блок-схема обобщенного устройства РЗ:

ИЧ - измерительная часть; ЛЧ - логическая часть;

ИО - исполнительный орган; СО - сигнализирующий орган;

ИП - источник питания;



**Рис. 5** - обобщенная схема продольной дифференциальной защиты линии;

Для обеспечения безопасной работы как правило разрабатывается комплекс из нескольких защит, частично перекрывающих друг друга по зоне действия. Для обеспечения требования *селективности* (отключение минимального поврежденного участка) все защиты, чье действие распространяется на определенную часть сети отстраиваются друг от друга по временной задержке, по току срабатывания или по другим параметрам. В этих условиях особое значение имеет теория расчета аварийных режимов сети и выбор соответствующих уставок защиты.

История расчетов аварийных режимов в электроустановках трехфазного переменного тока берет начало от первой электропередачи, созданной Михаилом Осиповичем Доливо-Добровольским. На гидроэлектростанции около города Лауфена (Германия) был смонтирован трехфазный генератор 300 л.с, повышающий трансформатор, линия электропередачи, понижающий трансформатор и приемник - в виде трехфазного двигателя. Налицо были все основные элементы современных систем электроснабжения. В их числе были смонтированы и устройства зашиты трехфазной линии электропередачи.

Интересна история первого срабатывания первого защитного устройства трехфазной системы. Еще при проектировании линии электропередачи общественность высказала опасение относительно безопасности линии, при каких либо ее повреждениях. Поэтому вместо предложенного М.О. Доливо-Добровольским напряжения 28 - 30 кВ было дано добро только на напряжение 15 кВ. Несмотря на это, после окончания строительства власти городов, вблизи которых проходила эта линия, запретили ее включение, потребовав дополнительных доказательств ее безопасности. И тогда автор пошел на рискованный эксперимент. После подачи напряжения, в месте пересечения этой линии с железной дорогой был искусственно оборван провод. Сразу после касания рельса проводом М.О. Доливо-Добровольский подошел к нему и на глазах многочисленных официальных представителей коснулся его голой рукой.

Нельзя не восхищаться его смелостью и уверенностью в том, что защита, сконструированная им, отключит поврежденную линию. Трудно представить более наглядную демонстрацию необходимости защитных устройств и эффективности их действия.  
По мере развития трехфазных систем электроснабжения в XX веке стала развиваться и техника релейной защиты, на первом этапе основанная на принципе реагирования на увеличение тока, протекающего через защищаемый элемент. Почти сразу встал вопрос о том, как отличить токи, определяемые нагрузкой, от токов, которые определяются повреждением элементов электроснабжения. Другими словами, возникла необходимость рассчитать ток короткого замыкания. Развитие техники релейной защиты и теории расчета токов короткого замыкания шли параллельно, взаимно стимулируя свое совершенствование. Действительно, оказалось, что все параметры устройств релейной защиты базируются на расчетах токов короткого замыкания. Чем сложнее устройство, тем больше параметров требуется от расчетов. И вот уже стало одних токов недостаточно, потребовались другие электрические величины, такие как напряжения, фазовые соотношения, сопротивления и т.п.

Такие расчеты уже нельзя называть расчетами токов короткого замыкания, это название сохранилось как условное, с пониманием того, что рассчитывается целый комплекс электрических величин, связанных с коротким замыканием.

Первые попытки расчета сразу же показали, что это задача непростая, что требуется глубокое изучение всех электромагнитных процессов, связанных с началом и протеканием процесса короткого замыкания, включая процессы в электрических генераторах, двигателях, трансформаторах, линиях электропередачи. Интересно отметить, что еще в 1900 году, когда во многих странах (в том числе и в России) уже существовали многочисленные трехфазные системы электроснабжения, фактически не существовала теория расчета токов короткого замыкания. Выбор оборудования производился «на глазок», например, выключатели выбирали примерно с трехразовым запасом по отношению к номинальному току, примерно также выбирались и защитные устройства [5]. При этом наблюдалось значительное количество повреждений различного оборудования, что не могло не вызвать озабоченности энергетиков.

Теоретическая база расчетов в тот период была готова только частично. Принципиальные законы расчета электрических цепей были уже известны, Г.Р. Кирхгоф еще в 1845 году сформулировал два основных закона расчета сложных электрических схем, он же положил начало расчета переходных процессов.

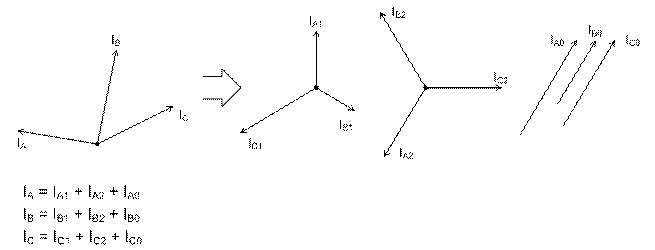
Следует заметить, что анализ электрических цепей положил начало интенсивному развитию теории графов - одному из разделов математики - *топологии*, которая в дальнейшем сама стимулировала развитие теории электрических цепей. Работая над системой трехфазного переменного тока, М.О. Доливо-Добровольский начал использовать *векторные диаграммы* для изображения трехфазных токов и напряжений. В 1893 году на международном электротехническом конгрессе американский электротехник Ч.П. Штейнмец показал возможность использования комплексных чисел для описания электрических величин переменного тока. Все эти достижения готовили базу для расчета токов короткого замыкания. Однако до 1900 года все переходные процессы рассматривались на основе дифференциальных уравнений, и переменный ток также рассматривался как непрерывный переходный процесс. При этом известный ученый Г. Ми, изучая процессы распространения гармонического колебания вдоль проводов круглого сечения, обнаружил, что понятия емкости и индуктивности не имеют самостоятельного значения, а входят в некоторые функции, в которые входит также частота гармонического колебания. Говоря современным языком, он ввел понятие *реактивного индуктивного* и *реактивного емкостного* сопротивлений.

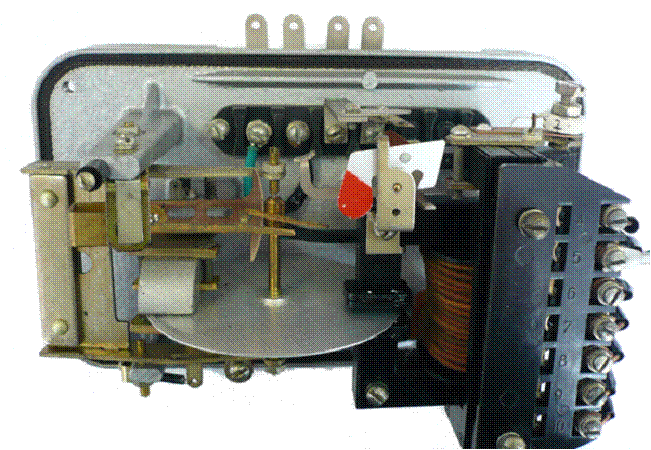
К 1909 году была разработана теория протекания тока в земле, что оказалось важным для анализа несимметричных коротких замыканий. Однако до 1930 года все расчеты переходных процессов велись, выражаясь современным языком, в фазных координатах, так в изданной в Берлине в 1926 году книге Селективная защита, все расчеты проводимостей и сопротивлений, а также токов и напряжений производятся для каждой фазы отдельно, что значительно усложняло проведение расчетов. Особенно эти трудности становятся понятными, если учесть возможности вычислительной техники того времени.   
Перелом произошел к 1930 году, когда американский ученый Фортескью предложил несимметричную и некомпенсированную систему векторов представлять в виде геометрической суммы двух симметричных и скомпенсированных векторов и одной не скомпенсированной системы одинаково направленных векторов. Впоследствии эта система расчетов получила название метод симметричных составляющих (Рис. 6). Преимущества такого метода расчета несимметрии оказались неоспоримыми, и он вошел в практику расчетов практически мгновенно.

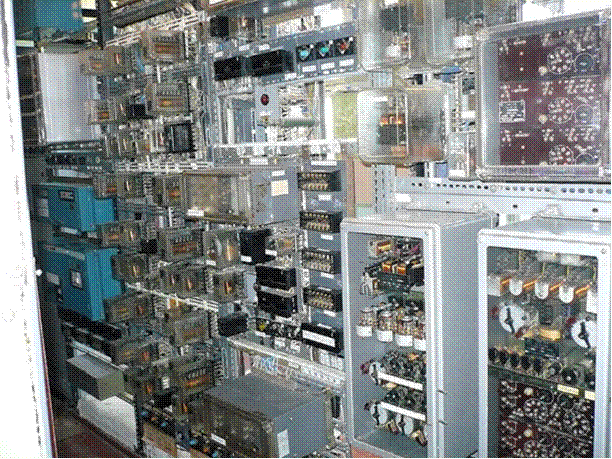
Модели постоянного тока сыграли выдающуюся роль в расчетах токов КЗ, но не столько в качестве инструмента, который позволял в упрощенной форме, но зато оперативно получать необходимые данные. Гораздо большую роль они сыграли как прообразы будущих кибернетических моделей электрических систем. Был осмыслен вопрос моделирования электрических процессов и границ их приемлемости, сформулировано понятие модели как конкретного воплощения абстрактных математических понятий моделей. Наконец, с их помощью были сформулированы требования к новому поколению моделей; моделям переменного тока. Однако, они не получили широкого распространения, поскольку были достаточно сложны, занимали много места, изготовлялись по индивидуальному заказу некоторых крупных энергосистем. Но несомненна их роль в формировании требований к созданию будущих моделей.  
Следующий этап - это появление вычислительной техники, которая позволила создать такие программы, которые могли рассчитать токи (а заодно и другие электрические величины), возникающие при коротких замыканиях. Первые опыты далеко не все были удачными, отчасти из-за недостаточной мощности ЭВМ первых поколений, а отчасти и от сложности решения таких задач. Например, пришлось отказаться от *метода контурных токов* (основанного на втором законе Кирхгофа), позволяющего достаточно просто учитывать взаимоиндукцию и продольные несимметрии и взять за основу *метод узловых потенциалов* (основанный на первом законе Кирхгофа), который оказался в целом более эффективен. По мере роста возможностей ЭВМ совершенствовались и программы. Следует сказать, что современные ЭВМ позволяют создать уже в настоящее время такие программные модели, которые в значительной степени можно было бы назвать изоморфными, т.е. взаимно-однозначно отображающими изучаемые процессы.

Симметричные составляющие получили распространение не только в расчетах токов КЗ, но и в практике релейной защиты в виде соответствующих фильтров симметричных составляющих.

Сейчас физические модели постоянного и переменного тока ушли в историю. Их место прочно заняли цифровые методы расчета на базе программ и соответствующих ЭВМ, мощность которых постоянно растет, что открывает безграничные возможности по совершенствованию программ расчета электрических режимов и в частности расчета токов КЗ. Но что понимать под совершенствованием? Можно говорить об организации программ, о способах общения ЭВМ с человеком. Но не менее необходимо говорить и о содержании программ будущего. При создании программ нового поколения должен реализовываться принцип максимального соответствия расчетных электрических величин реальным, в частности с использованием оперативной и ретро информации.

  
**Рис. 6** - метод симметричных составляющих;

  
**Рис. 7** - внешний вид индукционного реле РТ-80;

  
**Рис. 8** - панели релейной защиты

В настоящее время в разных областях начинает получать широкое применение микропроцессорная техника, в основе которой находятся микропроцессоры. Это перспективное направление начинает применяться и для осуществления релейной защиты, которая реализуется уже не с помощью реле, а в виде программ, закладываемых в память микропроцессорных систем.

Развернуты начатые много раньше перспективные работы по созданию и введению в опытную эксплуатацию программных защит с использованием микропроцессорной техники во многих организациях.

Большие и сложные задачи перед релейщиками были поставлены при проектировании, сооружении и введении в эксплуатацию линий электропередачи сверхвысокого и ультравысокого напряжений. Эти задачи были успешно решены.  
Необходимо отметить, что техника релейной защиты за последние десятилетия интенсивно развивалась и за рубежом, особенно в США, Швеции, Финляндии, Японии, Франции, Англии и ФРГ, опубликовано большое число научно-технических трудов, преимущественно в периодических изданиях, в частности фирменных. Принципиально представлялось бы весьма целесообразным такое выполнение защит от повреждений, при котором они могли бы не только фиксировать происшедшее повреждение, но и выявлять намечающееся. Практически в большинстве случаев выполнять такие защиты затруднительно или даже невозможно (например, защиту от КЗ, происшедшего вследствие грозового разряда). К этому, однако, необходимо стремиться.

В выводе, возможно, стоит обратить внимание на все возрастающую значимость системы релейной защиты и автоматики. Действительно, если в начале века в плане ГОЭЛРО говорилось о 1,5 ГВт мощностей на весь Советский Союз, то сейчас речь идет уже о сотнях и тысячах гигаватт. Кроме того, все больше растет интеграция сетей друг в друга, новые магистральные линии связывают независимые энергосистемы, кроме того, в будущем возможно и объединение энергосистем различных государств.

В этих условиях предъявляются новые требования к защите, например магистральные линии больших мощностей и на большие расстояния имеет смысл делать не только сверхвысокого напряжения, но и постоянного тока, а для обеспечения защиты таких линий требуются совершенно особенные системы защиты.

Наступивший новый век и третье тысячелетие ставят новые грандиозные задачи перед энергетиками и, в общем комплексе решения этих задач, роль специалистов по противоаварийному управлению будет возрастать. Для того чтобы не отстать от общего прогресса этой области необходимо сейчас всячески поддерживать работу опытно-конструкторских предприятий и внедрять их наработки.

**Занятие 16. Зарождение и развитие промышленной электроники. Автоматизированные системы управления энергетическими и производственными процессами**

Электроника — область науки и техники, изучающая электрофизические явления в вакууме, газе, твердом теле и на границе сред; приборы и системы, основанные на этих явлениях.

Современная электроника, опираясь на достижения в различных областях знаний, в свою очередь, обогащает и способствует развитию других наук и производств, вооружая их новыми техническими средствами и методами. Электроника оказывает существенное влияние на жизнь человека, его образ мышления и поведение, на состояние среды обитания.

Можно рассматривать и характеризовать электронику в различных аспектах. Первый из этих аспектов предполагает рассмотрение электроники как части фундаментальной науки — физики. Электроника — это наука, изучающая взаимодействие заряженных частиц между собой, с электромагнитными полями и с веществом. Эта часть науки решает теоретические проблемы и задачи экспериментальных исследований. Второй аспект подразумевает область техники, включающую прикладные применения названного взаимодействия потоков заряженных частиц между собой, с электромагнитными полями и с веществом. Поэтому в качестве содержательного термина используется понятие «электронная техника».

Электроника как фундаментальная наука и ее прикладной аспект развивались в непрерывном взаимодействии. Результат тонкого физического эксперимента в короткий срок приводил к созданию и серийному выпуску нового класса электронных приборов. В свою очередь, электронные приборы позволили реализовать методы наблюдения, измерения процессов в микромире, неосуществимые иными средствами.

Электроника как наука зародилась на рубеже XIX и XX столетий. Ее предметом и по сей день является прежде всего изучение законов взаимодействия свободных и связанных электронов и других заряженных частиц между собой и с электромагнитными полями; разработка принципов, методов и технологий создания электронных приборов, использующих эти взаимодействия для преобразования электромагнитной энергии в собственном рабочем объеме прибора и заполняющей его среде для обеспечения требуемых условий и результатов функционирования. Во второй половине XX в. с большей или меньшей степенью условности оформились три основных направления электроники как науки: электровакуумная (включая плазменную); твердотельная (полупроводниковая); квантовая электроника.

Электроника как область техники решает вопросы создания на основе электронных приборов аппаратуры, систем и комплексов различных видов и поколений для выполнения функциональных задач в многочисленных разветвлениях энергетики, радиотехники, информатики; технологии разработки и производства различной вещественной и информационной продукции; доведения ее до потребителей; прогнозирования и оценки результатов (в том числе побочных) этого потребления и предотвращения (а то и ликвидации) нежелательных последствий.

В зависимости от степени развитости той или иной сферы науки, производства и применения, от доминирующего предназначения и специфичности условий, от удобства классификации, изучения, описания и преподавания, наконец, просто от складывающегося восприятия понятий (в том числе на бытовом уровне) уже появилось и продолжает появляться множество производных терминов от термина «электроника».

Эти производные более или менее адекватно отражают:

частные направления в собственно электронной науке и технике, например: катодная электроника, СВЧ-электроника, микроэлектроника, функциональная электроника, криоэлектроника, релятивистская электроника и т.д.;

доминирующий признак, объединяющий разнообразные направления электронной науки и техники (например, радиоэлектроника);

особую область применения, например: космическая электроника, авиационная электроника (авионика), бытовая электроника и пр.

Особое место по распространенности, профессиональному уровню, степени влияния на другие области техники и производства, развитию различных структур занимает промышленная электроника. Промышленная электроника как направление электронной техники зародилась в 40-х годах XX в. Ее появление было своего рода велением времени и неслучайно соответствующие направления с их проблематикой и терминологией появились на разных языках в технической литературе различных стран.

В последние годы определились три основных направления промышленной электроники: энергетическая (силовая) электроника (преобразование электрической энергии), информационная электроника (электронные средства получения информации, ее преобразования, отображения, использования в управлении), технологическая электроника (воздействие на вещество потоками частиц, электромагнитным излучением).

Впервые содержание промышленной электроники было сформулировано основателем кафедры промышленной электроникой МЭИ И.Л. Кагановым в 1947 г. За прошедшие десятилетия по этой дисциплине были подготовлены тысячи специалистов. Помимо МЭИ кафедры промышленной электроники существуют и готовят специалистов более чем в 20 вузах России и бывших республик Советского Союза. Само понятие промышленной электроники оказалось динамичным, и его содержание изменяется с каждым новым шагом технического прогресса.

В 60-х годах, термин «промышленная электроника» получил более широкое содержательное наполнение, охватывающее преобразовательные электронные устройства и источники электропитания (с соответствующими схемотехническими элементами, электровакуумными и полупроводниковыми приборами), а также информационные системы для электроэнергетики, технологии и управления промышленными объектами.

Промышленная электроника в вышеприведенном ее понимании охватывает все отрасли промышленности. Доминирующими направлениями в ее развитии являются:

1) преобразование тока промышленной (50 Гц) или иной частоты в постоянный (выпрямление) и преобразование постоянного тока в переменный с заданной частотой (инвертирование), а также преобразование переменного тока одной частоты в переменный ток иной частоты;

2) электропитание (вторичные источники) любых промышленных, в том числе радиотехнических, установок с выполнением регулирующих, стабилизирующих, защитных, коммутирующих и других функций; управляемый энергообмен между различными источниками энергии (например, сеть и солнечная батарея) либо между источниками и накопителями энергии (например, сеть и конденсаторная батарея); первое и второе направления объединяют названием «силовая (энергетическая) электроника»;

3) электронные средства систем управления, регулирования, контроля, сбора и отображения информации о состоянии промышленных объектов. В последние годы в связи с широким распространением промышленных микроконтроллеров электронные средства управления включают в себя комплекс аппаратных и программных средств; это направление называют «информационной электроникой»;

4) создание установок и устройств, обеспечивающих технологическое воздействие на материалы, детали машин, биологические и другие объекты и среды за счет использования потоков электронов и ионов, потоков электромагнитного излучения, включая излучение оптического диапазона (в том числе лазерного); это направление называют «технологической электроникой».

Несмотря на всю условность такого подхода, он достаточно полно отражает области применения промышленной электроники и в значительной мере ее элементную базу — электровакуумные (включая газоразрядные) и полупроводниковые электронные приборы, электронные источники, генерирующие потоки заряженных частиц и электромагнитные излучения (включая высокочастотные (ВЧ), ультравысокочастотные (УВЧ), сверхвысокочастотные (СВЧ) и излучения оптического диапазона).

Создание транзисторов в 50-х годах положило начало развитию полупроводниковой информационной техники.

Первый отечественный точечный транзистор обладал усилительными свойствами, однако большой технологический разброс параметров и сильное влияние температуры на параметры прибора сделали его мало перспективным прибором для усиления. Расцвет полупроводниковой схемотехники начался с создания и широкого распространения плоскостных сплавных транзисторов. Такие привлекательные качества транзисторных устройств, как отсутствие цепей накала и мгновенная готовность к действию, малые габариты и высокая механическая прочность, неограниченный срок службы, были главными аргументами в течение первых лет развития полупроводниковой схемотехники в споре со сторонниками ламповой электроники. Те, в свою очередь, указывали на низкое входное сопротивление, температурную нестабильность, сравнительно низкую предельную частоту.

Так или иначе, вновь появившийся прибор — транзистор привлекал внимание специалистов разных направлений. Появилась система параметров, учитывающая, в отличие от ламповых каскадов взаимосвязь не трех, а четырех параметров: входных и выходных токов и напряжений.

Были разработаны схемы каскадов и методы расчета цепей смещения, обеспечивающие стабильность режима покоя. Значительная доля транзисторных усилителей промышленного назначения работает с сигналом сетевой частоты 50 Гц и представляет собой фазочувствительный усилитель с выходом на постоянном токе. Такие усилители использовались для управления контакторами, электромашинными и магнитными усилителями, а также в качестве промежуточных звеньев для управления тиристорными и иными мощными силовыми ключами.

Подобные фазочувствительные усилители нуждаются в уменьшении мощности потерь в выходных каскадах. Здесь важную роль играет не столько КПД каскадов, сколько решение проблемы охлаждения транзисторов. Снижение мощности потерь было достигнуто заменой постоянного питающего напряжения фазочувствительных каскадов пульсирующим, полученным непосредственно в результате выпрямления переменного напряжения сети.

Полупроводниковые приборы предоставили разработчикам схем новые возможности: наличие двух видов транзисторов — *p-n-р-*и *п-p-n-*типов дало новые решения балансных симметричных схем.

Успешно разрабатывались транзисторные стабилизаторы напряжения. Их показатели были очень высоки: хорошая стабильность, высокая эффективность, множество дополнительных функциональных возможностей (защита от перегрузок, плавный пуск). Неслучайно стабилизаторы стали теми функциональными узлами, которые одними из первых начали выпускать в виде конструктивно завершенных гибридных, а затем и монолитных интегральных схем.

Продолжением и естественным развитием идеи высокоэффективных преобразований сигналов является использование ключевых свойств транзистора. Кажущаяся очевидной мысль о нулевых потерях мощности в идеальном ключевом элементе не сразу получила свое практическое выражение. Одним из первых завершенных транзисторных преобразователей с использованием ключевого режима стал хорошо известный генератор Ройера (С.Н. Royer, 1955 г., США) — автогенератор с магнитной связью на основе материалов с прямоугольной петлей гистерезиса. Схемы на основе подобных генераторов быстро вытеснили контактные вибропреобразователи в источниках питания. Для того чтобы ключевые режимы транзисторов можно было использовать в целях обработки аналоговой информации требовалось глубокое понимание спектральных преобразований сигнала при различных видах импульсной модуляции и существенное повышение частотных свойств транзисторов.

Одним из первых теоретических положений о возможности передачи аналоговой информации с ограниченным спектром последовательностью импульсов следует считать теорему В.А. Котельникова (1933 г.); идеи спектральных преобразований модулируемых сигналов были развиты в классических работах А.А. Харкевича. Для реализации экономичных импульсных методов обработки сигналов потребовалось достижение предельных частот транзисторов на несколько порядков выше частоты передаваемого сигнала.

Практические достижения этого нового и перспективного направления применения транзисторов были реализованы О.А. Коссовым (1964 г.) и О.А. Хасаевым (1966 г.). Важную роль в распространении знаний о транзисторах, их практическом применении в промышленной электронике сыграли ставшие периодическими выпуски сборников статей «Полупроводниковые триоды в автоматике» под редакцией Ю.И. Конева.

Значительным успехом транзисторной электроники стало создание и широкое распространение кремниевых биполярных транзисторов. Благодаря физическим свойствам кремния эти транзисторы обладают более высокой стабильностью свойств при колебаниях температуры, значительно меньшими обратными токами переходов по сравнению с германиевыми. По мере совершенствования технологии и повышения чистоты исходного материала повысились предельные напряжения на переходах с 20–50 В у первых германиевых транзисторов до нескольких сотен вольт у современных кремниевых. Так же быстро росли частотные свойства приборов: от десятков и сотен килогерц у первых сплавных германиевых приборов до десятков мегагерц у современных кремниевых.

Изобретение в 50-е годы полевых (униполярных) транзисторов вначале не оставило заметного следа в полупроводниковой схемотехнике. Положение изменилось с разработкой новых технологий изготовления переходов. Современные полевые транзисторы не уступают биполярным по предельным значениям параметров и частотным свойствам и образуют самостоятельную группу с явно выраженными свойствами и областью применения.

Было бы несправедливо описывать развитие полупроводниковой электроники только с позиции совершенствования и обновления элементной базы. Создание новых устройств и систем промышленной электроники затронуло все сферы производства. Промышленность успешно освоила автоматизированное проектирование и производство печатных плат, беспроводной монтаж, методы входного и пооперационного контроля изделия. Тем не менее производство новых типов изделий проходило последовательно одни и те же этапы: задание на разработку, создание структурной и функциональной схем, разработка принципиальной схемы с использованием доступных и разрешенных комплектующих элементов; далее конструирования, подготовки производства и т.д. Каждая новая разработка проходила все этапы. В этих условиях было естественно для изделий массового производства автоматизировать все этапы разработки и изготовления. Так родились системы автоматизированного проектирования (САПР), системы изготовления печатных плат, системы размещения деталей и автоматической пайки, контроля плат и готовых изделий.

Новой сферой применения средств электроники стала обработка логических сигналов. До сих пор предполагалось, что любой сигнал содержит информацию, которая ставится в соответствие с количественной характеристикой сигнала: мгновенным значением аналогового напряжения, частотой гармонического носителя, длительностью импульса в последовательности.

Наряду с такими сигналами все большее применение находили логические сигналы, которые могли принимать фиксированное множество значений и отвечали на вопрос, принадлежит или не принадлежит данный сигнал к одному из подмножеств.

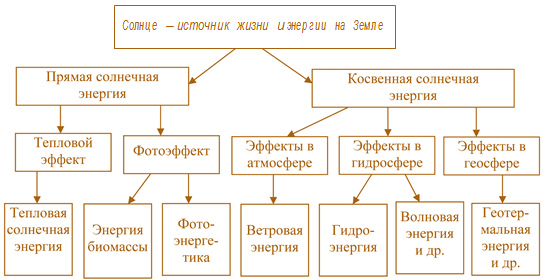
Общеизвестными стали двоичные (бинарные) сигналы, которые давали однозначный ответ на вопрос, истинно или ложно то или иное положение. Информация в таком сигнале содержалась не в уровне сигнала, а в его принадлежности к некоторому множеству. У бинарных сигналов это множество соответствует двум различным значениям, которые определяются как высокий (единичный) и низкий (нулевой) уровень. С логическими бинарными сигналами часто встречаются в технике, когда возникает необходимость отобразить состояние контакта (замкнут, разомкнут), транзисторного ключа (насыщен или находится в режиме отсечки). На основе логических переменных были введены логические функции. Примером логической функции может служить правило функционирования некоторого устройства: агрегат должен быть включен, если присутствует напряжение сети, температура не вышла из допустимых пределов, а с момента подачи сигнала на включение прошло не менее 5 с. На начальном этапе развития логических устройств в 50-е годы была осознана возможность реализации любых алгоритмов логического управления при ограниченном элементном базисе. Достаточно иметь весьма ограниченный набор типовых логических элементов, например, И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, чтобы из них можно было создать электронное устройство любой сложности и любого функционального назначения.

Первые типовые логические элементы создавались на основе транзисторно-резисторных, диодно-транзисторных, транзисторно-транзисторных ячеек (РТЛ, ДТЛ, ТТЛ), выполняемых из дискретных компонентов навесным монтажем или на печатных платах. Конструктивно они выполнялись в виде компактного параллелепипеда в пластмассовом корпусе, иногда залитого эпоксидной смолой. Монолитный брусок с набором внешних выводов имел хорошие механические свойства. Слабым местом устройств были внешние выводы и соединения. Проектирование логических устройств означало полное, исчерпывающее описание функционирования на языке булевой алгебры, приведение к выбранному элементному базису и схемотехническое (топологическое) проектирование.

**Занятие 17. Альтернативные и возобновляемые источники электроэнергии. Сверхпроводимость**

Одним из приоритетных направлений развития энергетики в ХХI в. является широкое использование возобновляемых источников энергии, имеющих огромные ресурсы, что позволит снизить отрицательное влияние энергетики на окружающую среду, повысить энергетическую и экологическую безопасность.

К традиционным источникам энергии относятся: невозобновляемые, включающие уголь, природный газ, нефть, уран; возобновляемые, включающие гидроэнергетику, древесину в виде дров.



Современная энергетика в основном базируется на невозобновляемых источниках энергии, которые, имея ограниченные запасы, являются исчерпаемыми и не могут гарантировать устойчивое развитие мировой энергетики на длительную перспективу, а их использование – один из главных факторов, приводящий к глобальному ухудшению состояния окружающей среды и ее кризисному состоянию.

К нетрадиционным (альтернативным) относятся возобновляемые источники энергии (ВИЭ), которые используют потоки энергии Солнца, энергию ветра, теплоты Земли, биомассы, морей и океанов, рек, существующие постоянно или периодически в окружающей среде и в обозримой перспективе соответственно практически неисчерпаемые. Все ВИЭ разделяются на две группы, использующие прямую энергию солнечного излучения и ее вторичные проявления (косвенная солнечная энергия), а также энергию взаимодействия Солнца, Луны и Земли.

Результатом косвенной деятельности Солнца являются соответствующие эффекты в атмосфере, гидросфере и геосфере в виде энергии ветра, гидроэнергии, энергии течений, волн, приливной энергии, тепловой энергии окружающей среды и др. (рис. 1.1).

К нетрадиционным возобновляемым источникам энергии относится малая гидроэнергетика с ГЭС мощностью до 30 МВт, а в ряде стран до 10 МВт.

Основными преимуществами ВИЭ по сравнению с традиционными невозобновляемыми источниками являются:

практически неисчерпаемые ресурсы;

снижение отрицательного влияния на окружающую среду, включая выбросы различных загрязняющих веществ, парниковых газов, радиоактивное и тепловое загрязнение и др.

Основными факторами, ограничивающими использование нетрадиционных ВИЭ, являются:

-малая плотность энергетического потока, которая составляет, например, для солнечной энергии на поверхности земли 1,36·10-3 МВт/м2, ветровой при скорости ветра 10 м/с – 6·10-4 МВт/м2, геотермальной – 3·10-8 МВт/м2, в то время как для энергии АЭС – 0,2 МВт/м2 ;

-значительная неравномерность выработки энергии во времени и ее использования;

-относительно высокие капиталоемкость энергетических установок и стоимость вырабатываемой электроэнергии.

Необходимость широкого использования ВИЭ определяется быстрым ростом потребности в электрической энергии, которая по прогнозам должна увеличиться по сравнению с 2000 г. в 2 раза к 2030 г. и в 4 раза к 2050 г.; исчерпанием в обозримом будущем разведанных запасов органического топлива; кризисным состоянием окружающей среды в связи с загрязнением оксидами азота и серы, углекислым газом, пылеподобными частицами от сгорания топлива, радиоактивным и тепловым загрязнением и др.

Возобновляемые источники энергии имеют принципиальные отличия, поэтому их эффективное использование является возможным на основе научно разработанных принципов превращения энергии ВИЭ в виды, необходимые потребителям. В окружающей среде всегда существуют потоки возобновляемой энергии, поэтому в процессе развития возобновляемой энергетики необходимо ориентироваться на местные энергоресурсы, выбирая наиболее эффективные из них. Использование ВИЭ должно быть многовариантным и комплексным, что позволит ускорить экономическое развитие регионов. Например, хорошей базой для использования ВИЭ могут служить агропромышленные комплексы, где отходы животноводства и растениеводства являются сырьем для получения биогаза, а также жидкого и твердого топлива, производства удобрений.

*Таблица 1.1 Энергетический потенциал возобновляемых источников энергии*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Возобновляемые энергоресурсы | Показатели, млрд. т у.т./год | |
| Технический | Экономический |
| Лучевая энергия Солнца | 5 | 1 |
| Тепловая энергия морей и океанов | 1 | 0,1 |
| Энергия ветра | 5 | 1 |
| Гидроэнергия, в том числе: |  |  |
| энергия водотоков\* | 4,5 | 2,6 |
| энергия волн | 0,05 | 0.01 |
| энергия приливов | 0,7 | – |
| Энергия биомассы (за исключением дров) | 2,55 | 2,0 |
| Геотермальная энергия | 0,4 | 0,2 |

*\* Гидроэнергоресурсы водотоков даны для большой и малой гидроэнергетики.*

Для эффективного планирования энергетики на возобновляемых энергоресурсах необходимо: во-первых, систематическое исследование окружающей среды, аналогичное исследованиям геологического характера при поисках нефти или газа, вовторых, изучение потребностей конкретного региона в энергии для промышленного, сельскохозяйственного производства и бытовых потребностей. В частности, чтобы выбрать наиболее экономичный источник энергии, необходимо знать структуру потребителей энергии.

Одной из важнейших характеристик возобновляемых источников энергии является их энергетический потенциал – показатель, определяющий количество энергии, свойственное соответствующему виду ВИЭ.

Для оценки энергетических ресурсов возобновляемых источников энергии, возможных для использования, различают следующие виды энергетического потенциала ВИЭ:

-теоретический, характеризующий общее количество энергии;

-технический – часть теоретического потенциала, которую принципиально можно использовать при помощи современных устройств;

-экономически эффективный – часть технического потенциала, которую в настоящее время целесообразно использовать, исходя из экономических, социальных, экологических и других факторов.

Ориентировочные показатели энергетических ресурсов ВИЭ в мире показаны в табл. 1.1.

**2 Методические указания по самостоятельной работе**

**2.1 Методические указания по подготовке к практическим занятиям**

Самостоятельная работа студентов – это способ активного, целенаправленного приобретения студентом новых для него знаний и умений без непосредственного участия в этом процессе преподавателей.

В ходе самостоятельной работы должна осуществляться главная функция обучения – закрепление знаний, получение новых и превращение их в устойчивые умения и навыки.

Самостоятельная работа предполагает выполнение нескольких видов работ:

- изучение сущности и содержания основных научных и профессиональных категорий, которыми оперирует изучаемая дисциплина;

- ознакомление с основными научными концепциями, формирующими теоретические основы дисциплины;

- подготовка к практическим занятиям;

- изучение вопросов для самопроверки, подготовка кратких ответов по ним;

- изучение основной и дополнительной учебной литературы;

- подготовка к рубежному контролю;

- самостоятельная работа по выполнению контрольной работы;

- самостоятельная работа по подготовке к экзамену.

**2.2 Методические указания по выполнению контрольной работы**

При подготовке контрольной работы необходимо выбрать тему согласно рабочей программе учебной дисциплине и оформить реферат согласно стандарту выполнения студенческих работ

Структура работы автором самостоятельно, но текст работы должен обязательно содержать следующие составляющие:

1. Обоснование актуальности темы, постановка цели и задач работы, указание на предмет и объект исследования;

2. Обзор методов, применяемых при выполнении исследования. Это могут быть как общие методы научного познания: наблюдение, сравнение, измерение, моделирование, абстрагирование, анализ и синтез, исторический метод и метод систематизации и т.д.

3. Основное содержание индивидуального творческого задания должно последовательно раскрывать тему.

Необходимо пользоваться рекомендованной литературой основного и дополнительного списков, которая включает научные труды ведущих специалистов, ученых и практиков (монографии, учебники, учебные пособия).

При использовании других источников необходимо уделить особое внимание проверке качества информации, применять подход научного скептицизма.

**3 Методические указания по промежуточной аттестации по дисциплине**

Формой промежуточной аттестации по дисциплине «История электротехники» согласно учебному плану и рабочей программы дисциплины является экзамен.

Экзамен принимается преподавателем, который вел практические занятия.

При явке на экзамен студенты обязаны иметь при себе зачетную книжку, которые они предъявляют преподавателю в начале.

Форма проведения экзамена определяется согласно ФОС

Преподаватель, принимающий дифференцированный зачёт имеет право задавать студентам дополнительные вопросы, а также давать задачи и примеры в пределах учебной программы дисциплины.

Во время экзамена студенты могут с разрешения преподавателя пользоваться наглядными пособиями и справочной литературой, а также рабочими программами дисциплины.

Успеваемость студентов определяется оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Положительные оценки заносятся в зачётную ведомость и зачетную книжку, неудовлетворительные оценки проставляются только в экзаменационной ведомости.

В зачетной книжке также указывается трудоемкость сдаваемой дисциплины.