Высшее профессиональное образование

БАКАЛАВРИАТ

Б. И. КУДРИН

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УЧЕБНИК

для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
«Электроэнергетика и электротехника»

2-е издание, переработанное и дополненное

ACADEMIA

Москва
Издательский центр «Академия»
2012

УДК 621.3(075.8)
ББК 31.2я73
К888

Рецензенты:
советник ректора Приазовского государственного технического университета, академик Академии наук высшей школы Украины, зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», д-р техн. наук, проф. *И. В. Жежеленко*;
зав. кафедрой «Электроснабжение и электрический транспорт» Сибирского федерального университета, д-р техн. наук, проф. *В. И. Пантелеев*

Кудрин Б. И.

К888 Электроснабжение : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / Б. И. Кудрин. — М. : Издательский центр «Академия», 2012. — 2-е изд., перераб. и доп. — 352 с. — (Сер. Бакалавиат).

ISBN 978-5-7695-9307-9

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», модуль «Электроэнергетика» (квалификация «бакалавр»).

Рассмотрено электрическое хозяйство потребителей электроэнергии. Дана общая характеристика системы электроснабжения до и свыше 1 кВ. Приведены способы расчета электрических нагрузок, токов короткого замыкания, выбор аппаратов и сетей, особенности пуска и самозапуска электродвигателей. Описаны особенности транспорта электрической энергии по территории и цехам. Изложены нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения, вводимые с 2013 г. Освещены особенности инвестиционного проектирования электротехнической части. Разъяснены изменения, произошедшие в связи с реструктуризацией электроэнергетики. Предложен ценологический подход к оценке результатов электросбережения. Приведенные теория и практика электрообеспечения потребителей позволяют говорить о самодостаточной области технической деятельности.

Первое издание книги выходило под названием «Системы электроснабжения» (2011 г.)

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 621.3(075.8)
ББК 31.2я73

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

ISBN 978-5-7695-9307-9

© Кудрин Б. И., 2012
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2012
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вступление России в постиндустриальное общество в условиях глобализации экономики лишь обостряет проблемы электроснабжения промышленных предприятий и городов, инфраструктуры и сельского хозяйства, сферы услуг и быта.

Решение видится, с одной стороны, в разработке перспектив развития электроэнергетики на основе стратегии, разрабатываемой на долгосрочную перспективу; с другой стороны — в рационализации электропотребления при качественном и надежном электроснабжении любого и каждого потребителя в требуемом ему объеме и необходимой мощности.

Углубляющаяся специфика электрообеспечения с точки зрения абонента — физического или юридического лица как потребителя — порождает особенности преподавания систем электроснабжения и различных схемных режимов, в том числе аварийных. Область изучения — электрификация отраслевой экономики, сферы услуг, населения; существующие и перспективные подходы к электроснабжению вниз от определившейся с началом индустриализации границы раздела субъект электроэнергетики — потребитель (энергосистема — предприятие).

В учебном пособии учтены принципиальные изменения, вызванные количественным увеличением и качественным преобразованием поступающей электротехнической продукции, новые правовые основания электропотребления, определяемые Гражданским кодексом РФ и «Энергетической стратегией России на период до 2020 г.» (затем до 2030 г.), а также Федеральным законом от 26.05.2002 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике». Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию», введенное в действие с 01.06.2008, поставило точку в понятие «электроснабжение». Для объектов капитального строительства производственного назначения (здания, строения, сооружения производственного назначения, включая объекты обороны и безопасности) содержание проектной и рабочей документации раздела «Электроснабжение» отделено от понятия «сети электроснабжения общего пользования», так что внутризаводское электроснабжение стало просто электроснабжением.

Углубление электрификации отраслей экономики объективно для всех стран и сохраняется в XXI в. Валовой внутренний продукт и комфортность жизни корреляционно определяются электропотреблением, производительность труда в промышленности — электровооруженностью. Рациональное потребление электроэнергии на душу населения актуально для России, где уровень удельных и общих расходов электроэнергии высок практически на все виды выпускаемой продукции. Энергоемкость национального дохода в 2—4 раза выше, чем в развитых странах, у которых за последние 25 лет энергоемкость ВВП уменьшилась на 20...30 %. В России с 1990 г. энергоемкость продолжала возрастать, лишь относительно стабилизировавшись в 1999 г., когда рост промышленного производства превысил рост выработки электроэнергии. В 2005 г. электроемкость остается в 1,5 раза выше общемировой. К 2030 г. ожидается, что она снизится вдвое.

Эффективность использования электроэнергии — важнейшая часть обеспечения энергетической безопасности страны. В 2005 г. в России внутреннее электропотребление составило 941 млрд кВт·ч, в том числе промышленностью, ТВт·ч: в 1990 г. — 529; в 1997 — 325; в 2000 — 357; в 2005 г. — 443. «Энергетической стратегией России на период до 2030 г.» предусмотрено значительное увеличение потребления электроэнергии. Ввод генерирующих мощностей прогнозируется на 2011—2015 гг. 31,7 ГВт, на 2010—2030 гг. по максимальному варианту 228 ГВт, по базовому — 173 ГВт. За 2011 г. электропотребление по отношению к 2010 г. выросло на 1,7 %, достигнув 1 052 млрд кВт·ч. Электрики-потребители, решая проблемы систем электроснабжения, должны исходить из ряда объективных факторов, на которых будет основана государственная политика энергосбережения. Прежде всего это неизбежный рост цен на энергоносители. Цены будут расти на 15...20 % в год, так что электричество к 2015 г. подорожает на 70 или даже на 100 %. В результате энергетическая составляющая в затратах энергоемких отраслей промышленности будет расти.

Требуется иной подход к изучаемому материалу. Опираясь на использование классических законов физики (прежде всего — теоретических основ электротехники), широко применяя вероятностатистические системные взгляды (в пределе опирающиеся на нормальное распределение), следует овладеть и применять на практике ценологические представления. Речь идет о принципиально новом изложении ряда материалов по электроснабжению, отличающемся от традиционного и заключающемся в анализе того множества электродвигателей, трансформаторов, кабелей, которое как сообщество изделий образует систему электроснабжения.

Данное учебное пособие учитывает деятельность специалиста как исследователя систем электроснабжения, как проектировщика при инвестиционном строительстве и техническом перевооружении предприятий, как эксплуатационника электрического хозяйства, опреде-

ляющих наряду с научными исследователями дальнейшее развитие электрики, в том числе требования к конструкторам и фирмам — изготовителям электротехнической продукции — и требования к субъектам электроэнергетики, а также как менеджера, прогнозирующего, планирующего, организующего, руководящего и контролирующего заказ, получение, распределение и использование электротехнических устройств (изделий) и электрической энергии.

Первым вузовским электротехническим курсом в России стали лекции по гальванике и электромагнетизму, которые вел Б. С. Якоби (1849 г.). Первую лекцию по электротехнике прочитал в 1898 г. Б. И. Угримов, по курсу «Районные электрические станции» — М. К. Поливанов (1916 г.). В 1918 г. К. А. Круг организовал в МВТУ им. Н. Э. Баумана электротехнический факультет, а к 1925 г. произошло разделение энергетиков и электриков. В 1921 г. электропромышленный факультет открылся в Институте народного хозяйства им. Г. В. Плеханова. В середине 1920-х гг. уже разрабатывался курс «Электроснабжение промышленных предприятий», образовалась научная секция «Районная и фабрично-заводская электрификация». Выход в 1937 г. книги А. С. Либермана «Подстанции малой мощности в электроснабжении промышленных предприятий» констатировал оформление науки «Электроснабжение» и выделение ее как области, ориентированной на интересы потребителей. Из научных школ, определяющих нормативную и учебную документацию в области электроснабжения, можно выделить московскую, харьковскую, новочеркасскую, горьковскую, ленинградскую, новосибирскую.

Отличительной чертой данного учебного пособия является комплексный учет происшедших изменений, характеризующих электрическое хозяйство (электрику) вообще и электроснабжение в частности. Уделено внимание рассмотрению вопросов взаимоотношений с энергоснабжающей организацией и заявке параметров электропотребления.

Многие ученые и практики начиная со времен индустриализации, когда стали формироваться электрические хозяйства, и включая последние годы, когда потерпела крах идея централизованно «дойти» до каждого электродвигателя и нагревателя, до каждой кнопки и розетки, способствовали рождению и становлению научного подхода к построению, а следовательно, к преподаванию систем электроснабжения. Среди ученых и практиков, стоявших у истоков промышленной электроэнергетики следует отметить Б. Л. Айзенберга, И. А. Будзко, В. И. Вейца, В. А. Веникова, С. Д. Волобринского, С. А. Волотковского, А. А. Глазунова, В. И. Гордеева, А. А. Ермилова, Г. М. Каялова, Б. А. Константинова, Н. В. и Ю. Н. Копытовых, И. Д. Кутявина, А. С. Либермана, Б. Г. Меньшова, Ю. Л. Мукосеева, А. А. Никулина, М. И. Озерного, В. В. Прокопчика, И. А. Сыромятникова, А. А. Тайца, В. И. Трапицына, С. А. Ульянова, А. А. Федорова, М. К. Харчева, В. В. Шевченко, О. П. Шишкина, В. И. Щуцкого.

Глава 1

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ: ДВА ОБЪЕКТА, ДВЕ МАТЕМАТИКИ, ДВА МИРОВОЗЗРЕНИЯ

1.1. Этапы развития электротехники и электроэнергетики

В широком смысле электричество следует воспринимать как обширнейшую область теоретического знания и практического применения, включающую в себя свойства, действия и проявления; получение, преобразование, передачу, распределение и использование электричества как материала и энергии во всех видах. Хотя «рождение» слова уходит в античность, лишь XIX в. сформулировал в 1800 — 1830 гг. электрическую науку и создал к 1880-м гг. электрическую технику. Первая превратилась в теоретические основы электротехники (ТОЭ), вторая — в электротехнику как отрасль промышленности и сферу деятельности.

На I Международном конгрессе электриков (1881 г., Париж) получила документальное оформление электромагнитная система единиц CGS, были определены и получили наименование электрические единицы: вольт, ампер, ом, кулон, фарада. На II Международном конгрессе электриков (1889 г., Париж) были определены характеристики переменного тока, приняты электрические единицы: джоуль, ватт, десятичная свеча. На III Международном конгрессе электриков (1891 г., Франкфурт-на-Майне) были рассмотрены вопросы разработки электрооборудования, развития многофазных систем. На IV Международном конгрессе электриков (1893 г., Чикаго) были приняты эталоны электрических единиц измерения, обсуждена система символов для обозначения различных электрических величин. Все это привело к образованию Международной электротехнической комиссии (МЭК) (1904 г.) и утверждению статуса ТОЭ как вполне сложившейся науки.

Теоретические основы электротехники разработали физики, исследуя вопросы электромагнитной индукции, экспериментируя с электромагнитными и магнитоэлектрическими генераторами. В 1838 г. Э.Х.Ленц сформулировал принцип обратимости генераторного и двигательного режимов электрической машины и в 1847 г. обнаружил явление реакции якоря. В 1840 г. Б.С.Якоби при исследовании созданного им электродвигателя описал явление противоэлектродвижущей силы. Дж.Джоуль и Э.Х.Ленц в 1834 — 1844 гг. сформулировали закон выделения теплоты в проводнике с током. Г. Кирхгоф в 1845 — 1847 гг., предлагая законы ветвления токов, ввел топологические

понятия для электрической цепи. Г. Гельмгольц в 1847 г. обосновал принцип суперпозиции и дал математическое выражение для закона электромагнитной индукции. Методы контурных токов и узловых потенциалов были развиты в работах Г. Гельмгольца и Дж. Максвелла в 1860-х гг. Теория колебательного разряда конденсатора создана В. Томсоном (1855 г.) и Г. Кирхгофом (1864 г.). Важнейшим явились открытие явления вращающегося магнитного поля, создание системы двухфазного тока (Г. Феррарис, 1885 г.) и ее развитие (Н. Тесла, 1886), изобретение П. Н. Яблочковым (1876 г.) и И. Ф. Усагиным (1882 г.) трансформатора, М. О. Доливо-Добровольским — трехфазного трансформатора и асинхронного двигателя (1888 г.).

Теоретическим фундаментом электротехнической науки и промышленности явилась система уравнений электромагнитного поля Дж. Максвелла (1873 г.), которая связала электрические и магнитные явления, тем самым объяснив порождение электричества магнетизмом, открытое Фарадеем, обнаружившим электромагнитное вращение, электромагнитную индукцию и введшим понятие поля и силовых линий (1831 г.). Законы механики Ньютона и электродинамики Максвелла легли в основу первой научной картины мира. Они могут быть выведены из принципа наименьшего действия, точнее, вариационных принципов механики.

Бурный количественный рост разнообразия электротехнического оборудования, требования электроснабжения городов и заводов, планы широкой электрификации потребовали решения проблемы генерации и передачи электроэнергии на расстояние, разработки промышленных типов трансформаторов и высоковольтного оборудования и привели к «рождению» электроэнергетики как науки и области практической деятельности.

После проведения I Международного конгресса электриков в 1881 г. был образован МЭК. Развитие электроэнергетики привело к необходимости создания МИРЭК (Мировой энергетической комиссии) в 1924 г., которая сейчас преобразована в СИГРЭ (CIGRE — International Council on Large Electric Systems). Можно выделить некоторые этапы становления «большой энергетики». З. Т. Грамм (1873 г.) изготовил локомобильно-электрогенераторную установку для электроснабжения предприятия. Г. Уайлд исследовал синхронизацию двух генераторов переменного тока (1868 г.). Первая заводская электростанция в России была построена на Сормовском машиностроительном заводе в 1876 г. В Петербурге на Мойке в 1883 г. была включена первая в России электростанция общего пользования. Ф. А. Пироцкий исследовал, а Д. А. Лачинов теоретически обосновал вопрос о передаче большого количества электричества на большое расстояние. Дж. Лейн-Фокс (1880) изобрел первые счетчики электроэнергии. В Великобритании были введены первые правила устройства электроустановок (1882 г.). Г. Феррарис (1884 г.) ввел понятие коэффициента мощности, Э. Томсон в 1886 г. применил защитное зазем-

ление, А. Э. Кеннели в 1889 г. получил зависимость между сечением проводника и длительно допустимым током нагрузки. Р. Кромптон впервые (1891 г.) применил понятие коэффициента спроса при определении электрических нагрузок. П. Бушеро установил (1898 г.) конденсаторы для компенсации реактивной мощности. В. Петерсен предложил (1917 г.) систему компенсации емкостных токов замыкания на землю. Область устойчивости параллельной работы энергосистем в 1920-х гг. основополагающими теоретическими работами определил А. А. Горев. И. А. Сыромятников внедрил (1937 г.) самозапуск электродвигателей при кратковременном перерыве питания.

Рождение электроэнергетики у нас неразрывно связывают с планом ГОЭЛРО (1920 г.), который отражал достигнутый уровень электроэнергетических знаний. Идеология ГОЭЛРО, как и идеология индустриализации (1926 г.), стали догмами, обязательными для всех. План включал в себя следующие положения:

- строительство социалистического хозяйства идет по единому государственному плану;
- индустриализация опирается на опережающее развитие тяжелой промышленности, средства производства опережают средства потребления;
- производство концентрируется, сооружение промышленных комбинатов осуществляется на базе энергетических центров;
- промышленность географически перемещается, а строительство городов (городских районов) осуществляется на базе градообразующих предприятий;
- электрификация развивается опережающе при концентрации мощностей и централизации электроснабжения.

Очевидно, что основой ГОЭЛРО был курс на централизацию и гигантизм в ущерб индивидуальному и мелкому. План был самым радикальным из трех, обсуждавшихся в 1913 г., — все в руках государства. Он получил логическое завершение, когда в 1930-х гг. была обоснована необходимость, в 1950-х гг. было завершено создание Единой энергетической системы. В начале 1980-х гг. возникли проблемы обеспечения электроэнергией промышленности, села, населения. К этому времени концепция ГОЭЛРО по всем положениям устарела (кроме нереализованного лозунга: «Электрификация всей страны»). Происшедшая с неизбежностью реформа электроэнергетики (2003 г.) пошла по второму варианту (первый вариант — все частное): генерация — частная; передача, управление единой системой, тарифы — государственные. Реструктуризация основывалась на принципах либерализации рынка, декларируя свободный доступ любого производителя и любого потребителя к электрической сети.

Стратегическая задача развития электроэнергетики Российской Федерации до 2030 г. и на перспективу до 2050 г. — не разработка плана развития экономики на базе электрификации (как это было в 1920 г.), а рассмотрение расчетных сценариев, включающих в себя

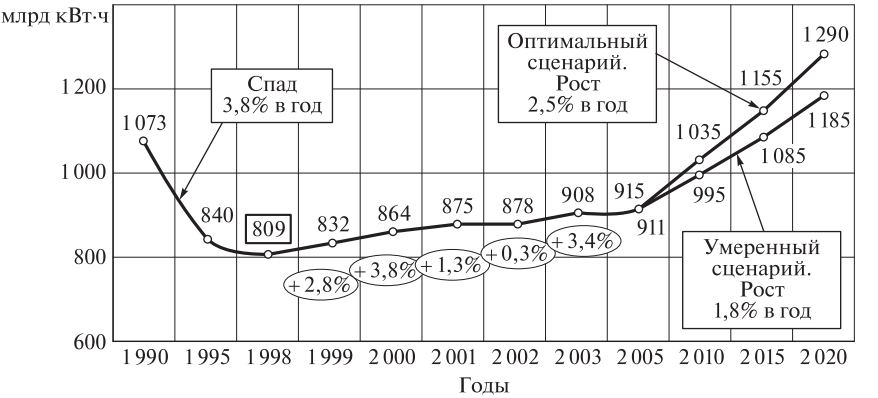


Рис. 1.1. Прогноз электропотребления в Российской Федерации на период до 2020 г.

формирование стратегического видения, описание ключевых инвестиционных проектов, внедрение системы долгосрочного прогнозирования. Энергетическая стратегия остается основой развития экономики России. При прогнозе роста электропотребления 1,8 ... 2,5 % результат развития электроэнергетики за 30 лет представлен на рис. 1.1.

Правительство РФ в 2007 г. одобрило Генеральную схему размещения объектов электроэнергетики России до 2020 г. в целях максимально эффективного использования потенциала энергетического сектора для роста экономики и повышения качества жизни. Подразумевается увеличение среднеотраслевого КПД, снижение удель-

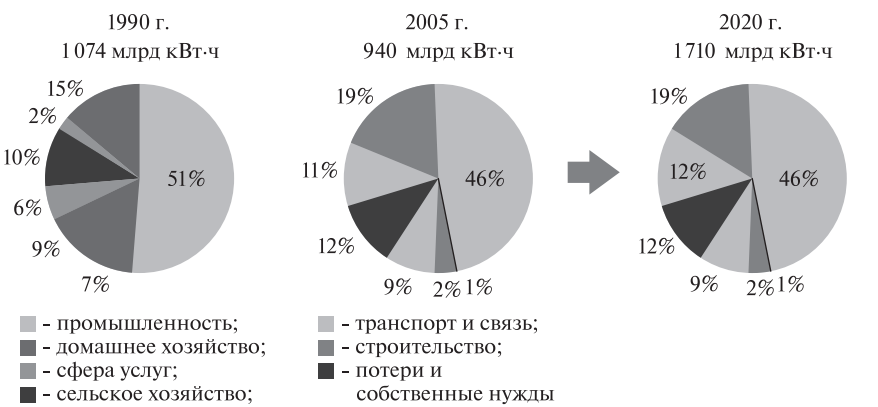


Рис. 1.2. Прогноз электропотребления на период до 2020 г. (базовый вариант)

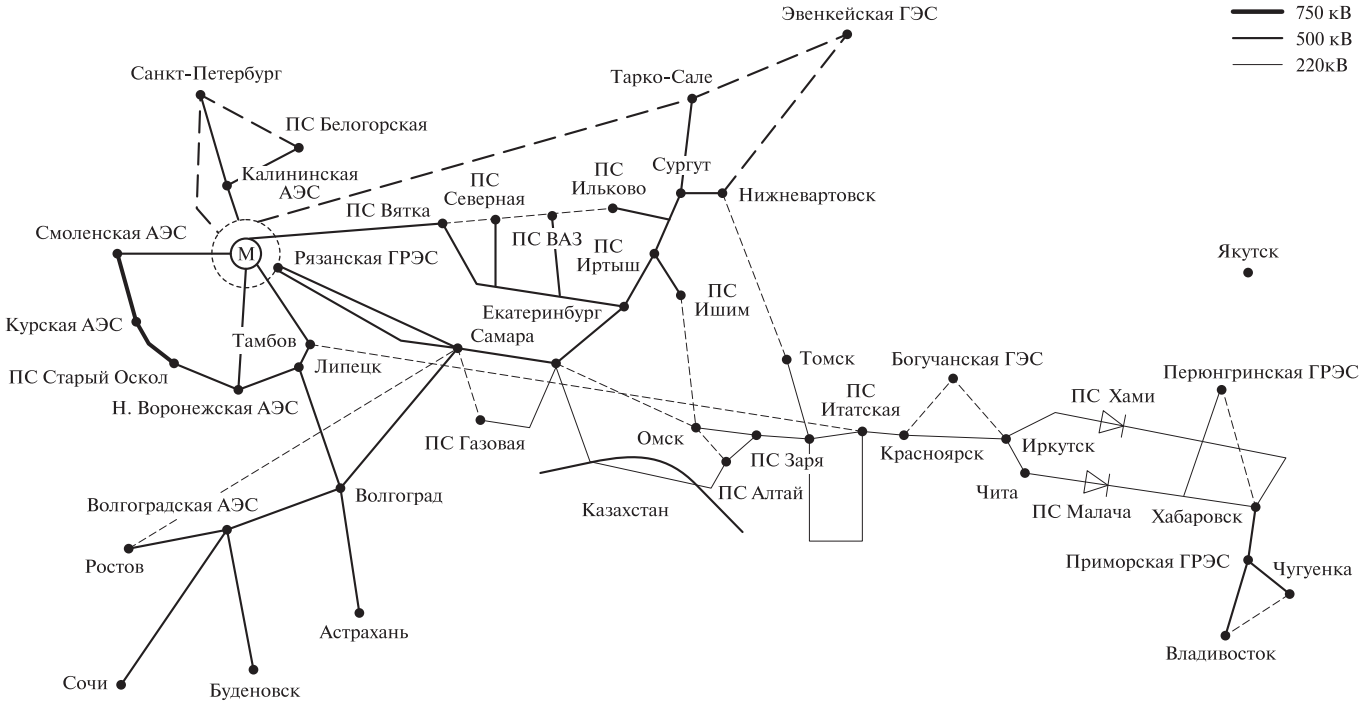


Рис. 1.3. Схема развития сетевой инфраструктуры

ных расходов топлива, повышение маневренности и управляемости, создание избыточной сетевой инфраструктуры, обеспечивающей полноценное участие энергокомпаний в рынке электроэнергии и мощности, а также усиление межсистемных связей.

Схема ориентирована на рост 4,1 ... 5,2 % с соответствующим увеличением объема электропотребления до 1710 (рис. 1.2) ... 2 000 млрд кВт · ч и развитием сетевой инфраструктуры (рис. 1.3) с изменением соотношения отраслей по энергопотреблению. Энергетическая стратегия признает, что современная экономика России энергорасточительна. Существующий потенциал энергосбережения составляет 360 ... 400 млн условного топлива, 39 ... 47 % текущего потребления энергии (35 ... 37 % — потенциал промышленности; 25 ... 27 % — потенциал жилищно-коммунального хозяйства).

Структура (см. рис. 1.3) позволяет конкретизировать понятие системы электроснабжения как объекта. Развитие электроэнергетики привело к тому, что в 1960-е гг. энергосистемы получили право выдавать обязательные технические условия на присоединение, включая затраты промышленности на строительство собственных ТЭЦ. Было взято обязательство «довести электроэнергию до каждого коровника, станка, розетки» (рис. 1.4). Монополизм электроэнергетических систем стал абсолютным, опираясь (теоретически) на то, что генерирование и потребление во времени практически неразделены.

Традиционно считалось, что система электроснабжения — «внутри» электроэнергетической системы (рис. 1.5), и если рассматривать принципиальную схему (рис. 1.6), то хозяйство энергосистемы, система его электроснабжения неизмеримо велики по сравнению с электроснабжением как объектом потребителя, электроснабжение

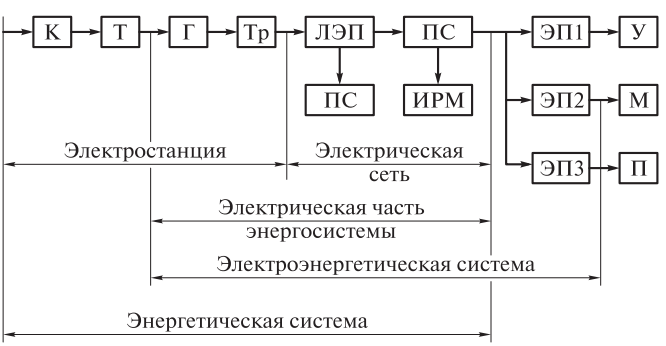


Рис. 1.4. Взаимосвязь объектов, обеспечивающих электроснабжение:

К — котел; Т — турбина; Г — генератор; $Т_Р$ — трансформатор; ПС — подстанция; ЛЭП — линия электропередачи; ИРМ- источник реактивной мощности; ЭП — электроприемник; У, М, П — механизмы

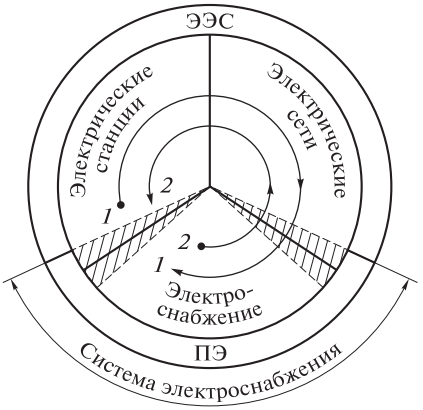


Рис. 1.5. Структурная схема электроэнергетической системы и взаимосвязей ЭСС и системы электроснабжения:

1 — прямые технологические связи выработки, передачи и применения электроэнергии; *2* — обратные связи влияний ПЭ на параметры и режимы ЭСС; ЭЭС — электроэнергетическая система; ПЭ — потребитель электроэнергии

которого десятки лет называлось внутризаводским и которое теоретически и практически отделять от энергосистемы не требуется. Иерархия передачи и распределения электроэнергии ведет к тому, что каждая из точек (см. рис. 1.3) порождает схему сетей, которая, в

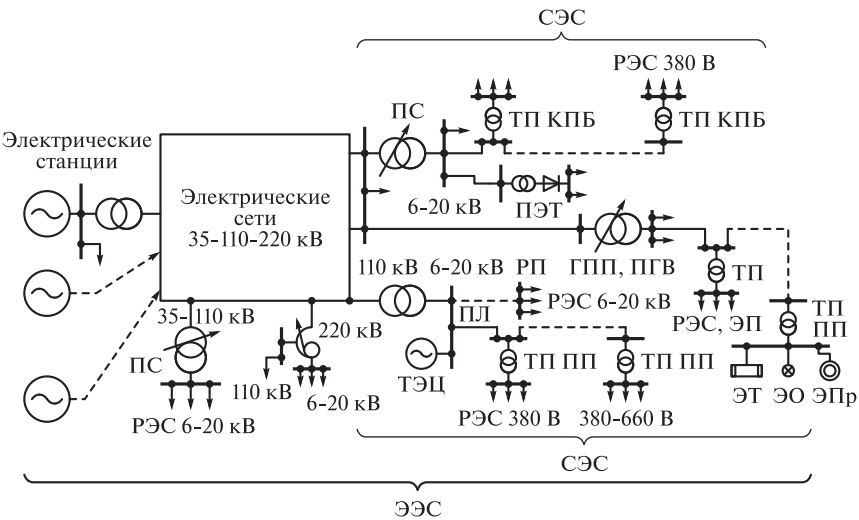


Рис. 1.6. Структурные принципиальные схемы электроснабжения потребителей и энергосистемы:

ПС — подстанция 35—220/6—20 кВ; ТЭЦ — теплоэлектроцентрали городские или промышленных предприятий; ТП ПП — трансформаторные подстанции 6—20/0,4—0,66 кВ промышленных предприятий; ТП КПБ —трансформаторные подстанции 6—20/0,4 кВ коммунально-бытовых потребителей; РП — распределительный пункт 6—20 кВ; РЭС — распределительные электрические сети 6—20 или 0,4—0,66 кВ; ПГВ — подстанция глубокого ввода

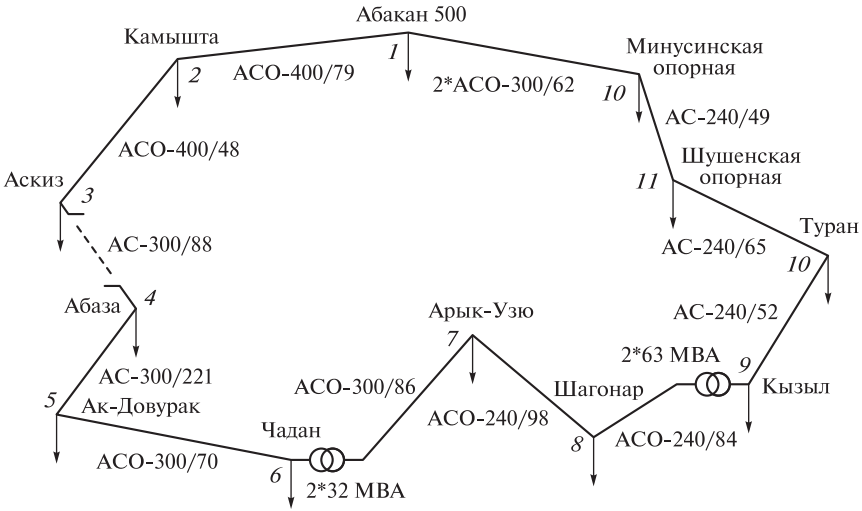


Рис. 1.7. Кольцевая схема высоковольтной сети Хакассия — Тува с питанием от подстанции «Абакан 500»

свою очередь, как на рис. 1.7 от подстанции Абакан-500, может организовалось кольцо, охватывающее регион. Такая иерархия заканчивается трансформаторными подстанциями ТП 10-6/0,4 кВ (рис. 1.8).

Такое понимание электроснабжения электроэнергетикой подтверждается данными по Москве, для которой в 2007 г. произвели 63,7 млрд кВт · ч. Январский 2008 г. максимум нагрузки (при температуре –10 °С) составил 16 200 МВт. Развитие энергосистемы рассчитывает на баланс до 18 700 МВт, что обеспечивается собственностью 611 подстанций 35/110/220 кВ мощностью 40 835 МВ · А. Общая протяженность линий электропередачи 35 — 220 кВ составляет 15 358,2 тыс. км; высоковольтных кабельных линий напряжением 35 — 110 — 220 — 500 кВ — 1 338,5 км, общая протяженность распределительных электрических сетей — 121 145 тыс. км. Общее количество распределительных и трансформаторных пунктов составляет 30 801. Численность персонала — 13 450 чел.

Рис. 1.4 и 1.6 наглядно демонстрируют, что электроэнергетика без исключения вбирала в понятие «электроснабжение» все, к чему подводится электроэнергия, совершенно не замечая объект — электрическое хозяйство потребителя (электрику), т. е. не выделяя границу раздела «потребитель (предприятие) — энергосистема». Исторически это объяснимо. Общие сведения об электрических системах и сетях начинались именно с расчета электрических сетей, так как электрические станции из-за сильной их практической зависимости от теории электрических машин сразу стали оформляться в самостоятель-

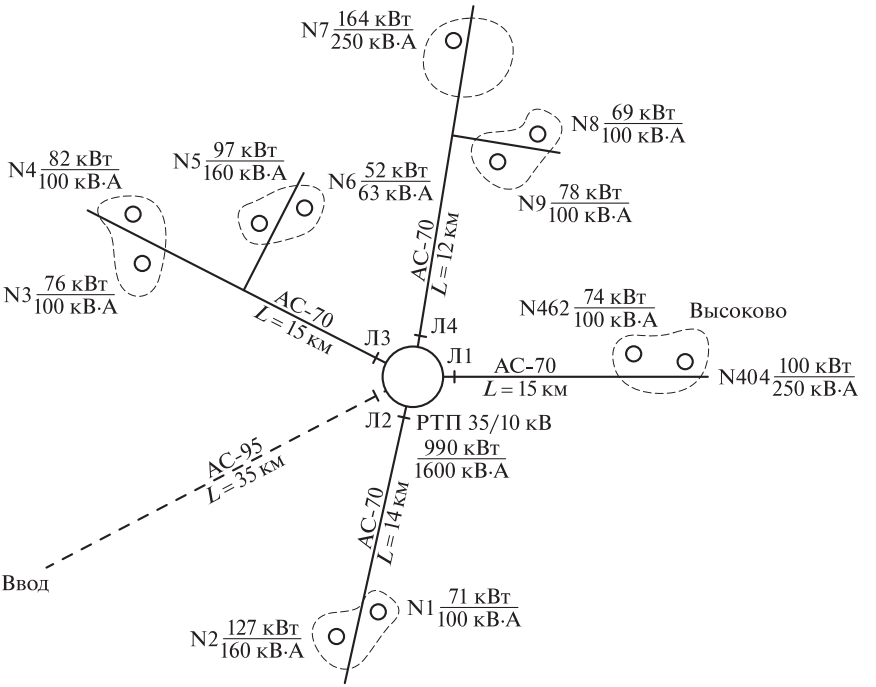


Рис. 1.8. Схема электроснабжения района

ную дисциплину. В. Н. Степанов (1933 г.), используя основополагающий труд А. А. Глазунова (1930 г.), выделял сети низкого напряжения сильного тока, высокого тока — до 35 кВ и начиная со 100 кВ.

В современной трактовке необходимых общих сведений об электрических системах и сетях приводятся краткие сведения об источниках питания; основных элементах электрических систем, в том числе сведения о потребителях активной и реактивной мощности и графиках их нагрузок, линиях электропередачи электрических сетей, подстанциях и распределительных пунктах.

Специфика же специальности проявляется при анализе установившихся режимов и переходных электромеханических процессов в электрических системах. Вводится понятие статической (а затем и динамической) характеристики элемента или подсистемы (узла) энергосистемы, под которой понимают зависимости между параметрами режима (координатами) при статическом изменении этих параметров (таком их изменении, при котором режим не отклоняется от установившегося).

Принципиален вывод В. А. Веникова (1970, 1985 гг.), что при управлении переходными процессами на первое место выдвигается

не математическая строгость и арифметическая точность расчета и даже не физическая (техническая) точность, а вероятность отклонения параметров управляемого режима от тех, которые признаны оптимальными. Следовательно, задачи управления переходными процессами должны решаться как вероятностные (стохастические).

Режим работы электрической системы задается (определяется) некоторым усредненным значением, восходящим к математическому ожиданию нормального распределения, отклонения от которого определяются конечной дисперсией. Электрические сети и системы (энергетика в целом) имеют дело с процессами и системами как абстрактными (идеальными) объектами исследования и управления. Расчеты режимов, оценка устойчивости и результатов функционирования опираются, не забывая ТОЭ, на теорию вероятностей и математическую статистику, кибернетику, теорию больших или сложных систем, системный анализ, исследование операций, технический анализ, многокритериальную оптимизацию.

Итак, можно говорить о постулате, лежащем концептуально в основе электроэнергетики: существует вероятность события как число, связанное с этим событием так, что вероятности в теоретическую модель входят в качестве свободных параметров, и можно говорить о численной практической достоверности, которая законом больших чисел и центральной предельной теоремой определяет различие или неразличимость (объектов) одного вида и разных.

1.2. Особенности становления промышленного электроснабжения

До XX в. потребители электрической энергии не выделялись как объект научных исследовании, во-первых, из-за скудости количества электрооборудования у отдельного потребителя (абонента); во-вторых, установка и эксплуатация отдельной лампочки, нагревателя (плитки), электродвигателя не была сложной, порождая «класс умельцев». Обратимся в качестве доказательства к проектам начала индустриализации, когда в феврале 1926 г. было принято решение о создании Государственного института по проектированию металлических заводов и начато проектирование металлозаводов (Магнитогорского и Кузнецкого металлургических, Ростсельмаша, Сталинградского тракторного, Новомосковского «Азота», Уралмаша и др.). Одновременно в 1926 — 1929 гг. выявилась специфика проектирования электрической части новых заводов, определяемая незначительным количеством электродвигателей (штуками-особями по цеху), намеченных к установке на заводе (табл. 1.1), и элементарностью системы управления.

Если перейти от электрооборудования, которое потребитель устанавливает, а изготавливает (поставляет) электротехническая про-

Таблица 1.1

Электропривод Криворожского металлургического завода по проекту 1929 г.

Моторы (электродвигатели) мощностью, кВт, до	Постоянного тока и коллекторные, шт.	Трехфазного тока, шт.	Всего по заводу		Пуск при помощи			
			шт.	%	рубильника	переключателя Y/Δ	пускового реостата	контроллера
3	30	347	377	29,4	266	20	6	85
5	22	92	114	8,4	38	32	6	38
10	54	208	262	19	—	78	66	118
20	85	154	239	17,3	—	17	85	137
40	77	162	239	17,3	—	2	100	137
65	37	37	74	5,4	—	—	32	42
100	11	16	27	1,9	—	—	8	19
150	—	11	11	0,8	—	—	4	7
250	4	4	8	0,5	—	—	4	4

Примечание. Всего электродвигателей — 1 390 шт.; $P_{ср}$ = 40 кВт; фактическое количество в 1985 г.: 62 011 шт.; 50,3 кВт.

мышленность, и от электроэнергии, которую потребитель использует, а поставляет субъект электроэнергетики, то определится круг проблем, которые возникли при построении, функционировании и модернизации систем электроснабжения. Сначала объективно отдавали большее предпочтение электроприводу. Электроснабжение как таковое в современном понимании отсутствовало: от ТЭЦ, еще не связанной с энергосистемой, высоковольтные кабели заходили на коммутационный пункт, управляющий единичным высоковольтным двигателем или включающий маломощный трансформатор 6(3)/0,4 кВ.

Электрики ТЭЦ, которая была режимным предприятием, эксплуатировали и отвечали не только за собственную выработку электроэнергии, но и за всю высоковольтную коммутационную аппаратуру и кабели, цеховые трансформаторы. Простота коммутационной аппаратуры и незначительность кабельных потоков не требовала выделения заводской электрослужбы (тем более цеха сетей и подстанций). Это иллюстрируется рис. 1.9, на котором изображена проектная схема электроснабжения трех металлургических заводов (Магнитогорского, Кузнецкого, Криворожского), которые проектировались одинаковыми в технологической части.

К середине 1930-х гг. стало ясно, что возник новый объект: сначала — внутрицеховое, затем — внутризаводское электроснабжение. Сложилась практика проектирования электрообеспечения для функционирования электропривода (электротермии, освещения), но теория электроснабжения предприятий отсутствовала. А. С. Либерман утверждал, что сложность поставленных задач заключается в том, что необходимо впервые дать теоретически обоснованные методы проектирования и направить это проектирование по новым, еще не использованным путям одновременной экономии цветных металлов

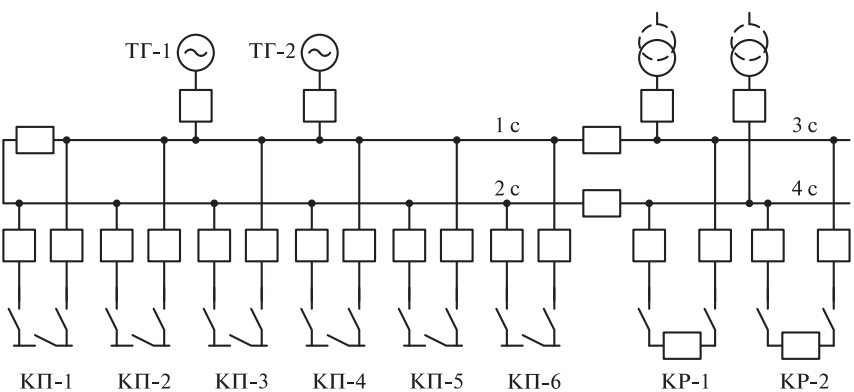


Рис. 1.9. Первая рабочая схема электроснабжения металлургического завода (ММК, КМК, Криворожсталь)

и энергии. В 1934 г. Электропром рекомендовал широкое применение подстанций малой мощности в системах электроснабжения фабрик и заводов. При выборе числа цеховых подстанции были приняты неизбежные упрощения:

а) применение эмпирических формул;

б) постоянство при различном числе подстанций веса цветных металлов в сети высокого напряжения;

в) равномерность распределения нагрузки по цеху.

Были осознаны важнейшие ценологические свойства:

1) выявить все действующие факторы невозможно практически;

2) формулы ТОЭ имеют ограниченную область применения;

3) наряду с общностью существует индивидуализация решений.

В 1936 г. Наркомтяжпром предложил дробление трансформаторных подстанций и расположение их в непосредственной близости к нагрузкам внутри цехов либо, в крайнем случае, у наружных стен цехов; рекомендовал в качестве типовых трансформаторные подстанции (ТП) мощностью не более 320 — 560 кВ · А; обязал расположение подстанций предусматривать уже в первоначальных стадиях проектирования. К середине 1930-х гг. выявилась необходимость в собственной терминологии: ЦРП — центральная распределительная подстанция; КР — коммутационный распределительный узел районной сети; КП — коммутационный промежуточный узел; КЦ — коммутационный узел цеховых трансформаторов.

Ключевым вопросом проектирования электроснабжения как с точки зрения электроэнергетики (присоединение к энергосистеме), так и с точки зрения обеспечения электроэнергией всех объектов электрического хозяйства (электрики) стал расчет электрических нагрузок, связанный с уровнем системы электроснабжения и стадией принятия проектного решения. При подготовке и реализации плана ГОЭЛРО нагрузки выбирались на основе укрупненных сведений (в частности, об электроемкости продукции, данных по районам для лимитирования предприятий, суточных графиков, коэффициентов попадания в максимум и одновременности). Использование основных электрических и технологических показателей и укрупненных сведений, в том числе электроемкости продукции, является основой комплексного метода, разработанного к 1930-м гг., который де-факто стал преобладающим при переходе (конец 1990-х гг. — начало XXI в.) к инвестиционному проектированию.

Со временем были разработаны методы выбора напряжений при минимальных числе трансформаций; числа, мощности и места расположения подстанций; параметров элементов систем электроснабжения с учетом динамики нагрузок; способов сохранения устойчивости двигателей при кратковременных перерывах электроснабжения; различного автоматического включения резерва (АВР), отдельных устройств релейной защиты и автоматики (РЗиА); подходов к оптимизации показателей качества электроэнергии.