

В.И. Идельчик

Электрические системы и сети

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.39
ББК 32
В11

В11 **В.И. Идельчик**
Электрические системы и сети / В.И. Идельчик – М.: Книга по Требованию, 2021. – 593 с.

ISBN 978-5-458-38089-8

Описаны элементы электрических сетей и инженерные методы расчёта их режимов. Даны сведения о рабочих режимах электроэнергетических систем и мероприятиях по повышению качества электроэнергии. Рассмотрены технико-экономические основы проектирования электрических сетей, режимы ЛЭП сверхвысоких напряжений и расчёты линий на механическую прочность. Изложены современные методы расчётов на ЭВМ нормальных и особых режимов электрических сетей и систем большой сложности, способы уменьшения потерь электроэнергии и оптимизации режимов систем и сетей. Для студентов электроэнергетических факультетов вузов, может быть полезен инженерам и аспирантам.

ISBN 978-5-458-38089-8

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ВВЕДЕНИЕ

В.1. ЭТАПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В СССР

Развитие энергетики и электрификации в значительной мере определяет уровень развития всего народного хозяйства нашей страны. В наследство от царской России мы получили отсталое хозяйство. В 1913 г. Россия по выработке электроэнергии занимала шестое место в Европе и восьмое место в мире. Суммарная мощность всех электростанций составляла 1,14 млн. кВт, а годовая выработка электроэнергии — 2,04 млрд. кВт·ч. После первой мировой войны, интервенции и гражданской войны хозяйство страны было в очень тяжелом положении. Производство электроэнергии в 1921 г. снизилось в 4 раза против довоенного и составило всего 0,52 млрд. кВт·ч.

Ленинский план электрификации России — план ГОЭЛРО, в котором в 1920 г. В. И. Ленин поставил задачу электрификации страны, — это первый в мире научно обоснованный комплексный план развития экономики страны на основе создания энергетической базы народного хозяйства.

План ГОЭЛРО, принятый на VIII съезде Советов в декабре 1920 г. и рассчитанный на 10—15 лет, предусматривал сооружение 30 новых электростанций общей мощностью 1,75 млн. кВт, рост выработки электроэнергии до 8,8 млрд. кВт·ч в год, а также строительство сетей 35 и 110 кВ для передачи мощности к узлам нагрузки и соединения электростанций на параллельную работу. План ГОЭЛРО определил основные направления научно-технического прогресса в электроэнергетике: концентрация генерирующих мощностей на крупных электростанциях, создание энергосистем и их объединение в масштабе всей страны.

Уже в 1930 г. план ГОЭЛРО был выполнен и к концу 15-летнего срока (1935 г.) значительно перевыполнен; вме-

сто 30 электростанций было сооружено 40; установленная мощность всех электростанций страны в 1935 г. достигла 6,9 млн. кВт, выработка электроэнергии — 26,8 млрд. кВт·ч. По производству электроэнергии СССР занял второе место в Европе и третье в мире.

Великая Отечественная война нанесла тяжелый урон энергохозяйству страны, оно было почти полностью разрушено на Украине и в Белоруссии, в Прибалтике и западных районах РСФСР. Оборудование многих электростанций было демонтировано и вывезено на восток. В наиболее тяжелый первый период войны установленная мощность электростанций снизилась более чем в 2 раза по сравнению с довоенной. С конца 1941 г. началась интенсивная работа по восстановлению разрушенного энергетического хозяйства. В 1946 г. суммарная мощность электростанций достигла довоенного уровня. В 1947 г. СССР по производству электроэнергии вышел на первое место в Европе и второе в мире.

Формирование Единой энергетической системы страны (ЕЭС СССР), начавшееся с создания ЕЭС европейской части СССР, было вызвано сооружением в 50-х годах мощных ГЭС на Волге и линий электропередачи сверхвысоких напряжений 400—500 кВ. Еще в 20-х годах в связи с введением напряжения 110 кВ сформировались энергосистемы основных промышленных районов страны: Москвы, Ленинграда, Донбасса, Урала и др. В 1940 г. была сооружена первая межсистемная связь 220 кВ Днепр—Донбасс и было организовано Объединенное диспетчерское управление (ОДУ) Южной энергосистемы.

В 1938 г. при проектировании Куйбышевской ГЭС возникла необходимость в передаче 1000 МВт на расстояние порядка 1000 км и началась разработка проекта промышленной передачи энергии постоянным током.

Война прервала работу над передачей постоянного тока Куйбышев—Москва.

Со второй половины 40-х годов работы, связанные с созданием электропередачи Куйбышев—Москва, возобновились. В 1956 г. передача энергии из Куйбышева от Волжской ГЭС им. В. И. Ленина в Москву была осуществлена на напряжении 400 кВ переменного тока. В дальнейшем эта электропередача была переведена на напряжение 500 кВ.

Уже через 12 лет после пуска этой первой линии протяженность эксплуатируемых электропередач 500 кВ в СССР достигла рекордной в мире цифры — 9000 км в одноцепном исчислении. Они образовали основные или системообразующие сети европейской части страны и послужили основой для последующего создания ЕЭС СССР. Непрерывная цепочка линий 500 кВ Волгоград—Москва—Куйбышев—Челябинск—Свердловск—Нижний Тагил длиной 3000 км связала Объединенные энергосистемы Поволжья, Центра и Урала. В эту систему была подключена и передача постоянного тока, соединившая Волгоград и Донбасс, Объединенная энергосистема Юга была связана с системами Северного Кавказа и Закавказья и через передачу 330 кВ подключена к ОЭС Северо-Запада—Центра. Передачи 500 кВ стали быстро развиваться и в ОЭС Сибири. К 1970 г. ЕЭС вышла далеко за пределы европейской части страны, ее сети охватили Закавказье, ряд областей Северного Казахстана и Западной Сибири. В 1972 г. в состав ЕЭС СССР вошла ОЭС Казахстана. В 1978 г. был сделан важнейший шаг на пути к завершению формирования Единой энергосистемы страны: на параллельную работу с ЕЭС СССР присоединилась ОЭС Сибири. Рост производства и потребления электроэнергии в СССР в 11-й пятилетке показан в табл. В.1.

В 1978 г. было завершено сооружение электропередачи 750 кВ Западная Украина (СССР)—Альбертирша (ВНР). С 1979 г. началась параллельная работа ЕЭС СССР и ОЭС стран — членов СЭВ. Сотрудничество социалистических стран в области энергетики сыграло большую роль в ускорении развития национальных энергосистем, повышении их надежности и экономичности. Высокая эффективность социалистической экономической интеграции была подтверждена опытом параллельной работы энергосистем стран — членов СЭВ.

С включением в состав ЕЭС СССР объединенной энергосистемы Сибири, имеющей электрические связи с энергосистемой МНР, и организацией параллельной работы ЕЭС СССР и ОЭС стран — членов СЭВ создано уникальное межгосударственное объединение энергосистем социалистических стран с установленной мощностью более 300 млн. кВт, охватывающее громадную территорию от Улан-Батора до Берлина.

Таблица В 1. Производство и потребление электроэнергии за 11-ю пятилетку, млрд. кВт·ч

Показатель	1980 г.	1985 г.	1985 г к 1980 г, %
Производство электроэнергии по СССР	1293,9	1544,2	119,4
В том числе:			
на АЭС	72,9	167,4	230
на ГЭС	183,9	214,5	116,6
на ТЭС	1037,1	1162,3	114,2
Из них Минэнерго СССР —	1197,9	1422	118,7
всего			
В том числе:			
на АЭС	54,1	128,4	223,8
на ГЭС	183	213	116,4
на ТЭС	960,8	1080,6	112,5
Потребление электроэнергии:			
в промышленности ¹	688	794	115,4
в строительстве	26,2	29,3	111,8
на транспорте	102,7	120,1	116,9
в сельском хозяйстве	111	145,7	131,3
в коммунально-бытовом хозяйстве городов	155	193	124,5

¹ Без собственных нужд электростанций.

В центральной зоне европейской части СССР в связи с сооружением мощных Волжских ГЭС и началом формирования ЕЭС функции основной системообразующей сети стали переходить к сети 500 кВ, наложенной на сеть 220 кВ. Тот же процесс характерен и для позднее развившихся ОЭС восточной части страны. В западной зоне европейской части СССР для новых мощных транзитных связей, налагаемых на развитые сети 330 кВ, было принято напряжение 750 кВ.

Возможности сети 500 кВ как системообразующей обеспечивали создание мощных ОЭС в других зонах страны и формирование ЕЭС на первом этапе ее развития. Дальнейшее развитие ЕЭС СССР потребовало освоения более высокого напряжения — 1150 кВ. Таким образом, формирование ЕЭС СССР осуществлялось в соответствии с исторически сложившимися условиями на основе применения *двух систем напряжений*: основной системы 110—220—500 кВ

с внедрением напряжения 1150 кВ и системы 110 (150)—330—750 кВ для западной зоны страны. Развитие ЕЭС привело к совместному применению напряжения 750 и 500 кВ в центральной зоне европейской части СССР.

Энергетическая программа, разработанная и осуществляемая в нашей стране, была охарактеризована на июньском (1983 г.) Пленуме ЦК КПСС как «крупнейший документ перспективного значения, своего рода ГОЭЛРО в современных условиях». Проект Энергетической программы был рассмотрен на заседании Политбюро ЦК КПСС в апреле 1983 г.

В Энергетической программе и в материалах XXVII съезда КПСС намечены следующие научно обоснованные принципы и важнейшие мероприятия по росту и совершенствованию топливно-энергетического комплекса страны на период до 2000 г.: проведение активной энергосберегающей политики при одновременном увеличении доли электроэнергии в суммарном расходе энергоресурсов; коренное изменение структуры топливного баланса народного хозяйства благодаря росту добычи природного газа и угля (открытым способом); дальнейшее развитие электроэнергетики с одновременным совершенствованием структуры мощностей электростанций в результате опережающего развития атомных электростанций (АЭС).

Осуществление Энергетической программы рассчитано на два этапа. Первый этап завершится на рубеже 80-х и 90-х годов (около 1990 г.), а второй — на рубеже XX и XXI веков (около 2000 г.). В число главных научно-технических задач первого этапа входит подготовка условий для широкого перевода экономики на энергосберегающий путь развития. Благодаря чисто организационным факторам (устранение наиболее очевидных источников потерь) можно получить только около 10 % возможной экономии энергоресурсов, остальное связано с проведением технических мероприятий. Они требуют разработки, изготовления и использования нового, более экономичного энергопотребляющего оборудования, внедрения новых менее энергоемких технологий, широкого применения приборов автоматического регулирования и контроля. Мероприятия по уменьшению расхода и потерь электроэнергии (см. гл. 12, 13) очень важны при переводе экономики на энергосберегающий путь развития. Основное содержание второго этапа

Энергетической программы включает решение как производственных задач по обеспечению растущих энергетических потребностей страны, так и дальнейшую разработку научно-технических проблем, вызванных потребностями дальнейшего развития энергетики в XXI веке. В результате энергосберегающей политики к концу второго этапа Энергетической программы предполагается значительное сокращение общей потребности в топливно-энергетических ресурсах в результате снижения норм удельных расходов электрической и тепловой энергии, а также замещения органического топлива нетопливными энергоресурсами, т. е. ядерной и гидравлической энергией.

Оптимальная структура мощностей электростанций, предусмотренная Энергетической программой, может формироваться только на основе непрерывного развития и совершенствования ЕЭС СССР, т. е. усиления межсистемных электрических связей (линий сверхвысокого напряжения). На первом этапе реализации программы ЕЭС СССР будет развиваться путем строительства линий электропередачи (ЛЭП) переменного тока напряжением 750 и 1150 кВ и постоянного тока 1500 кВ. В ОЭС Юга и Северо-Запада, где сложилась система напряжений 150—330—750 кВ, в 12-й пятилетке сооружаются ЛЭП 750 кВ для усиления межсистемных связей и выдачи мощности крупных АЭС.

К 1990 г. предусмотрено завершить сооружение уникального энергомоста — ЛЭП 1150 кВ переменного тока Сибирь (Канско-Ачинский топливно-энергетический комплекс — КАТЭК) — Казахстан (Экибастуз) — Урал и приступить к строительству первых участков магистрали Центр — Средняя Волга — Урал на этом напряжении, а также связи ЕЭС СССР с ОЭС Средней Азии. В 12-й пятилетке намечается ввести в действие около 2700 км ЛЭП 1150 кВ, что примерно в 3 раза больше, чем в 11-й пятилетке. В 1990 г. предусмотрено ввести в эксплуатацию первую в стране ЛЭП 1500 кВ постоянного тока Экибастуз — Центр длиной 2414 км. В последующие годы эта электропередача позволит создать оптимальный режим работы электростанций европейских районов страны и Сибири. После завершения строительства линии постоянного тока 1500 кВ возникнут также энергомосты Центр — Казахстан — Урал и Центр — Казахстан — Сибирь, которые существенно повысят надежность и маневренность всей ЕЭС СССР, а также

позволят привлекать мощности сибирских ГЭС для удовлетворения потребностей европейских энергосистем в часы их максимальной нагрузки.

Одновременно со строительством ЛЭП сверхвысокого напряжения будут строиться распределительные сети напряжением 35 кВ и выше, что имеет большое значение для повышения надежности электроснабжения потребителей и улучшения использования мощности электростанций.

На втором этапе реализации программы должно быть завершено формирование ЕЭС СССР с повышением ее маневренности и надежности. Создание сверхмощной межсистемной связи 1150 кВ переменного тока Центр—Средняя Волга—Урал—Экибастуз—Средняя Азия—Сибирь, а также работа ЛЭП 1500 кВ постоянного тока Экибастуз—Центр позволят обеспечить выдачу мощности крупных тепловых электростанций Экибастуза и КАТЭК в соседние районы, наиболее рационально использовать энергоресурсы отдельных регионов страны и более полно реализовать эффект снижения потребной установленной мощности электростанций за счет объединения энергосистем.

Важной задачей развития электроэнергетики является модернизация и демонтаж устаревшего и малоэффективного оборудования электростанций. Большие объемы демонтажа и модернизации устаревшего и малоэффективного оборудования предъявляют высокие требования к энергомашиностроению, к организации ремонтных работ, в ходе которых осуществляется модернизация, и к энергостроительству.

В Энергетической программе намечается создание материально-технической базы для использования новых нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Главными из них в ближайшие десятилетия будут солнечная и геотермальная энергия, а также энергия биомассы, а в более отдаленной перспективе — ветровая и приливная энергия. Годовое производство энергоресурсов за счет этих источников будет невелико. Их значение в основном в создании научно-технических заделов для энергетики XXI века.

Целесообразность создания мощных объединенных энергосистем и ЕЭС СССР обусловлена их большими технико-экономическими преимуществами. С увеличением мощности объединения появляется возможность сооружения крупных электрических станций с мощными, более эконо-

мичными агрегатами. При увеличении числа связей нагрузок с разными станциями в энергообъединении повышается надежность электроснабжения потребителей, увеличивается возможность более полного и рационального использования всего имеющегося оборудования. При этом возможно снижение суммарной установленной мощности электростанций за счет уменьшения общего резерва и обменных передач мощности в момент максимума потребления между районами с большой разницей во времени и поэтому с неодновременным максимумом потребления. Например, разница во времени в 2 часа между Москвой и Уралом позволяет уже сейчас за счет обменных потоков уменьшить необходимую установленную мощность. В будущем при электрической связи районов с разницей до 4 часов это уменьшение мощности будет еще значительнее.

При выполнении Энергетической программы необходимо учитывать вопросы *охраны окружающей среды*. Существенное влияние на развитие энергосистем оказывают все возрастающие требования к ограничению неблагоприятных воздействий энергетических объектов на окружающую среду. Повышение *экологических требований* к электростанциям усложняет их размещение и как следствие приводит к удалению электростанций от центров потребления. Повышение экологических требований к электрическим сетям проявляется прежде всего в необходимости сокращения занимаемых ими земельных площадей. Из этого вытекают новые технические решения: широкое распространение многоцепных линий электропередачи (до четырех—шести цепей разных напряжений на одной опоре), внедрение оборудования с элегазовой изоляцией, расширение применения кабелей высокого напряжения.

В.2. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Производство (генерация), распределение и потребление электрической и тепловой энергии схематически показаны на рис. В.1, а. *Электростанция* производит (или генерирует) электрическую энергию, а теплофикационная электростанция — электрическую и тепловую энергию. По виду первичного источника энергии, преобразуемого в электрическую или тепловую энергию, электростанции делятся на

тепловые (ТЭС), атомные (АЭС) и гидравлические (ГЭС). На ТЭС первичный источник энергии — органическое топливо (уголь, газ, нефть), на АЭС — урановый концентрат, на ГЭС — вода (гидроресурсы). ТЭС делятся на конденсационные тепловые станции (конденсационные электростан-

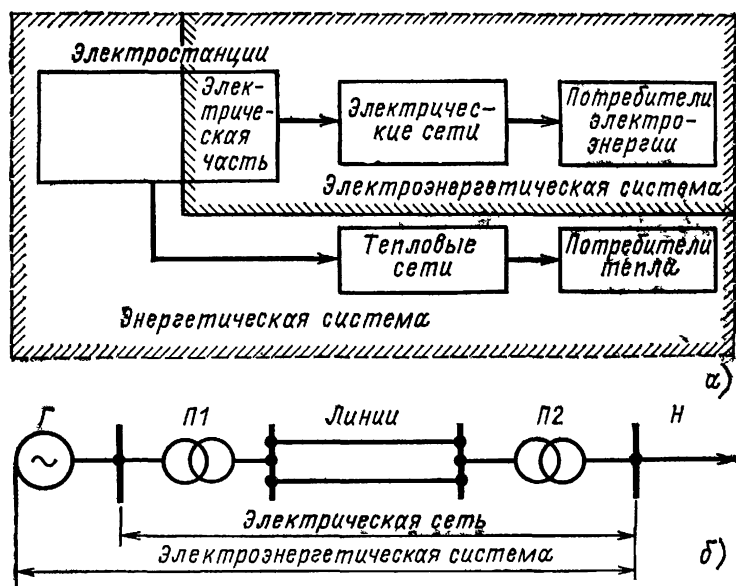


Рис. В.1. Схемы производства, распределения и потребления электрической и тепловой энергии

ции — КЭС или государственные районные электростанции — ГРЭС), вырабатывающие только электроэнергию, и теплофикационные (ТЭЦ), вырабатывающие и электроэнергию, и тепло.

Кроме ТЭС, АЭС и ГЭС существуют и другие виды электростанций (гидроаккумулирующие, дизельные, солнечные, геотермальные, приливные и ветроэлектростанции). Однако мощность их невелика.

Электрическая часть электростанции включает в себя разнообразное основное и вспомогательное оборудование. К основному оборудованию, предназначенному для производства и распределения электроэнергии, относятся: син-

хронные генераторы, вырабатывающие электроэнергию (на ТЭС — турбогенераторы); *сборные шины*, предназначенные для приема электроэнергии от генераторов и распределения ее к потребителям; *коммутационные аппараты — выключатели*, предназначенные для включения и отключения цепей в нормальных и аварийных условиях, и *разъединители*, предназначенные для снятия напряжения с обесточенных частей электроустановок и для создания видимого разрыва цепи (разъединители, как правило, не предназначены для разрыва рабочего тока установки); *электроприемники собственных нужд* (насосы, вентиляторы, аварийное электрическое освещение и т. д.). *Вспомогательное оборудование* предназначено для выполнения функций измерения, сигнализации, защиты и автоматики и т. д.

Энергетическая система (энергосистема) (рис. В.1, а) состоит из электрических станций, электрических сетей и потребителей электроэнергии, *соединенных* между собой и *связанных общностью режима* в непрерывном процессе производства, распределения и потребления электрической и тепловой энергии, при общем управлении этим режимом.

Электроэнергетическая (электрическая) система (рис. В.1, а, б) — это совокупность электрических частей электростанций, электрических сетей и потребителей электроэнергии, *связанных общностью режима* и непрерывностью процесса производства, распределения и потребления электроэнергии. Электрическая система — это часть энергосистемы, за исключением тепловых сетей и тепловых потребителей. *Электрическая сеть* — это совокупность электроустановок для распределения электрической энергии, состоящая из подстанций, распределительных устройств, воздушных и кабельных линий электропередачи. По электрической сети осуществляется распределение электроэнергии от электростанций к потребителям. *Линия электропередачи* (воздушная или кабельная) — электроустановка, предназначенная для передачи электроэнергии.

У нас в стране применяются стандартные номинальные (междуфазные) напряжения трехфазного тока частотой 50 Гц в диапазоне 6—1150 кВ (см. табл. 6.4), а также напряжения 0,66; 0,38 (0,22) кВ.

Напряжение 0,22 кВ не рекомендуется для вновь проектируемых сетей. Для генераторов применяют номинальные напряжения 3—21 кВ.