

В. С. Бойчук, А. В. Куксин

**ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2021

УДК 621.311
ББК 31.2
Б77

Рецензент:
главный инженер филиала
ПАО «МРСК Центра» – „Воронежэнерго”» *А. А. Бурков*

Бойчук, В. С.

Б77 Электрооборудование энергетических систем : учебное пособие / В. С. Бойчук, А. В. Куксин. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 268 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0761-8

Рассмотрены основные части энергосистемы, технические характеристики и особенности конструкций современных синхронных генераторов и компенсаторов. Описаны типы силовых трансформаторов и автотрансформаторов и их параметры, способы заземления нейтралей, причины и последствия коротких замыканий, типы разъединителей, отделителей, короткозамыкателей. Приведены конструктивные особенности высоковольтных выключателей и проводников, токоограничивающих и дугогасящих реакторов, измерительных трансформаторов тока и напряжения, а также закрытых распределительных устройств.

Для студентов и аспирантов электроэнергетических специальностей. Может быть полезно специалистам в области электроэнергетики и электротехники.

УДК 621.311
ББК 31.2

ISBN 978-5-9729-0761-8 © Бойчук В. С., Куксин А. В., 2021
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

Содержание

Глава 1. Характеристика элементов энергосистемы. Номинальное напряжение электроустановок. Общие сведения о потребителях электрической энергии.....	6
1.1. Характеристика элементов энергосистемы.....	6
1.2. Номинальное напряжение электроустановок.....	9
1.3. Общие сведения о потребителях электрической энергии...	9
Глава 2. Основные части энергосистемы: электростанции, межсистемные связи, подстанции, районные электрические сети и местные распределительные сети.....	12
2.1. Типы и виды электростанций.....	12
2.2. Электрические сети.....	16
2.3. Распределительные электрические сети 0,38–20 кВ.....	19
2.4. Воздушные линии электропередачи с неизолированными проводами межсистемных, районных, местных электрических сетей.....	20
2.5. Электрические подстанции.....	40
Глава 3. Основные технические характеристики и особенности конструкций современных синхронных генераторов и компенсаторов различных типов. Системы охлаждения. Системы возбуждения. Автоматическое гашение поля (АГП). Устройство формирования систем возбуждения. Характеристика режимов работы.....	41
3.1. Основные параметры синхронных генераторов.....	41
3.2. Системы охлаждения.....	49
3.3. Система возбуждения.....	59
3.4. Автоматическое гашение поля генератора.....	70
Глава 4. Типы силовых трансформаторов и автотрансформаторов и их параметры. Системы охлаждения. Конструктивные особенности трансформаторов и автотрансформаторов различных классов напряжения. Нагрузочная способность. Перегрузочная способность.....	76
4.1. Типы силовых трансформаторов и автотрансформаторов и их параметры.....	76

4.2. Системы охлаждения.....	86
4.3. Конструктивные особенности трансформаторов и автотрансформаторов различных классов напряжения.....	92
4.4. Нагрузочная и перегрузочная способность.....	122
Глава 5. Способы заземления нейтралей. Режимы работы. Типы и конструкции устройств для регулирования напряжения трансформаторов и автотрансформаторов.....	126
5.1. Способы заземления нейтрали.....	126
5.2. Типы и конструкции устройств для регулирования напряжения.....	129
Глава 6. Причины и последствия коротких замыканий (КЗ). Виды КЗ. Методы расчетов токов однофазного, двухфазного и трехфазного КЗ. Определение предельных токов КЗ. Применение ЭВМ для расчетов токов КЗ. Методы ограничения токов КЗ.....	135
6.1. Причины и последствия коротких замыканий.....	135
6.2. Методы расчётов токов однофазного, двухфазного и трехфазного КЗ.....	137
6.3. Методы ограничения токов КЗ.....	143
Глава 7. Типы разъединителей, отделителей, короткозамыкателей. Конструктивные особенности.....	159
7.1. Типы разъединителей и отделителей.....	159
7.2. Конструктивные особенности разъединителей и отделителей.....	171
Глава 8. Типы высоковольтных выключателей. Их параметры и конструкция. Принцип гашения дуги. Типы приводов.....	181
8.1. Масляные выключатели.....	181
8.2. Воздушные выключатели.....	192
8.3. Вакуумные выключатели 6–110 кВ.....	197
8.4. Элегазовые выключатели.....	206
Глава 9. Токоограничивающие реакторы, дугогасящие реакторы, измерительные трансформаторы тока и напряжения, их конструкция, назначение. Принцип работы.....	218

9.1. Измерительные трансформаторы тока.....	218
9.2. Измерительные трансформаторы напряжения.....	223
Глава 10. Типы проводников, применяемых на электростанциях и подстанциях. Комплектные токопроводы, их конструкции и выбор. Основные характеристики изоляторов и их выбор.....	237
10.1. Типы проводников, применяемых на электростанциях и подстанциях.....	237
10.2. Комплектные токопроводы.....	242
10.3. Основные характеристики изоляторов и их выбор.....	246
Глава 11. Закрытые распределительные устройства. Комплектные трансформаторные подстанции. Открытые распределительные устройства.....	255
11.1. Закрытое распределительное устройство (ЗРУ).....	255
11.2. Комплектные трансформаторные подстанции.....	259
Список литературы.....	265

Глава 1. Характеристика элементов энергосистемы. Номинальное напряжение электроустановок. Общие сведения о потребителях электрической энергии

1.1. Характеристика элементов энергосистемы

Электрические системы, совокупность объединённых для параллельной работы электростанций, линии электропередачи, преобразовательных подстанций и потребителей электроэнергии. Электрические системы имеет общий резерв и централизованное оперативно-диспетчерское управление для координации работы станций, подстанций и сетей. Часто электрические системы отождествляют с электроэнергетическими системами (ЭЭС), охватывающими теплоэлектроцентрали и тепловые сети. Электроэнергетическая система наряду с централизованным электроснабжением осуществляет централизованное теплоснабжение городов и промышленных центров. В научно-техническом плане переход к более широкому понятию – «ЭЭС» означает рассмотрение и не только электрической части системы и происходящих в ней электрических и электромеханических процессов, но и учёт связанных и с ними механических и тепломеханических процессов, протекающих в турбинах, котлах, трубопроводах. ЭЭС различают по установленной мощности, наличию связей с другими системами, структуре, генерирующим мощностям, территориальному охвату, плотности нагрузки, конфигурации. По установленной мощности системы разделяются (в первом приближении) на 3 группы: системы мощностью **свыше 5 ГВт, от 1 до 5 ГВт, до 1 ГВт** (к последней группе относятся также автономные системы электроснабжения, в том числе системы подвижных объектов – кораблей, самолётов и др.). Структура ЭЭС и установленная мощность зависят от типа и мощности входящих в систему электростанций (тепловых, гидроэлектрических, атомных и др.). Конфигурация ЭЭС и её коммутация могут быть различными (под конфигурацией системы понимается взаимное расположение вхо-

дящих в ЭЭС электростанций, основных электрических сетей или, в случае объединённой системы, отдельных подсистем; под коммутацией ЭЭС понимаются связи между электростанциями и центрами потребления электроэнергии). Отдельные ЭЭС соединены между собой (в электрической части) магистральными связями, служащими для однонаправленной передачи мощности из одной системы в другую, и межсистемными связями, предназначенными для взаимного обмена мощностью. Работа электрической системы (или ЭЭС) характеризуется режимом – совокупностью процессов, определяющих в любой момент времени значения мощностей, напряжений, токов, частоты и других величин, меняющихся в процессе работы системы. Различают установившийся и переходный режимы работы ЭЭС. При установившемся режиме ЭЭС мощность, напряжения, токи и т. д. практически неизменны; при переходном режиме они меняются либо в результате управления, т. н. целенаправленного воздействия персонала или автоматических устройств, – нормальные переходные процессы, либо под действием появившихся случайных возмущений, нарушающих режим системы, аварийные переходные процессы. Соответственно различают нормальный режим, т. е. работу ЭЭС в заданных условиях, при нормальных показателях электроэнергии качества, и аварийный режим, т. е. работу ЭЭС при возникновении в ней аварий, или при показателях качества электроэнергии, отличных от нормальных. Послеаварийный режим определяется как состояние системы после устранения аварийных условий. Качество работы электрической системы в первую очередь зависит от надёжности электроснабжения и показателей качества электроэнергии. Надёжность ЭЭС в целом определяется главным образом устойчивостью э. с. и их способностью противостоять развитию аварий, т. е. живучестью системы. Надёжная работа ЭЭС при авариях в значительной мере обеспечивается противоаварийной автоматикой, содержащей автоматическое регулирование возбуждения, релейную защиту, а также профилактическую защиту, сообщающую о состоянии элементов системы и возникающей опасности их отказа. Проти-

воаварийная автоматика содержит автоматическую разгрузку по частоте (АРЧ), а в ряде случаев и по напряжению (отключение части потребителей при опасном изменении этих параметров режима), автоматическое включение резерва (АРВ), автоматическое повторное включение (АПВ) элементов системы, автоматическую ликвидацию асинхронного хода у части системы, а также ряд других мероприятий. Основная задача ЭЭС – обеспечить централизованное энергоснабжение при едином оперативно-диспетчерском регулировании процессов производства, передачи и распределения электроэнергии. В СССР управление работой ЭЭС возложено на диспетчерские службы районных энергоуправлений, подчинённых объединённым диспетчерским управлениям (ОДУ) ЭЭС. Оперативно-диспетчерское управление работой объединённых ЭЭС (ОЭЭС) осуществляется Центральным диспетчерским управлением Единой энергетической системы СССР. Достижение оптимального уровня электрификации страны при наиболее экономичном и бесперебойном электроснабжении требует решения многих научных задач, в том числе по оптимизации развития и оперативному управлению работой ЭЭС. При решении этих задач широко используют системный подход, системный анализ и средства кибернетики.

Создание ЭЭС обеспечивает экономически целесообразное увеличение мощности электрических станций и энергоагрегатов; повышает надёжность энергоснабжения за счёт более гибкого маневрирования резервами электрической системы; снижает общий (совмещенный) максимум нагрузки вследствие несовпадения суточных пиков нагрузки по отд. районам, что приводит к снижению потребной мощности в объединённой энергосистеме; позволяет устанавливать наиболее выгодные режимы работы для различных типов электростанций и агрегатов; способствует сокращению перевозок топлива и широкому использованию гидроэнергетических ресурсов, часто удалённых от основных потребителей электроэнергии на значительные расстояния.

1.2. Номинальное напряжение электроустановок

Преимущественное распространение получила электрическая сеть переменного тока. В СССР приняты номинальные напряжения для таких ЭС: 12, 24, 36, 48, 60, 127, 220, 380, 660 В; 3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750 кВ. Электрическая сеть напряжением до 220 В применяют для питания электроприёмников малой мощности (осветительные бытовые приборы, электрические аппараты и др.). В условиях повышенной опасности, например, для местного освещения рабочих мест на промышленных предприятиях, используют напряжение не выше 36 В, а в шахтах – 12 В. Электрическая сеть напряжением 380 В – 10 кВ предназначаются для питания более мощных электроприёмников, главным образом крупных электродвигателей. Электрическая сеть напряжением 6 кВ и выше используют в основном для передачи и распределения электроэнергии с последующим понижением напряжения. Питающие сети и большая часть распределит, сетей выполняются воздушными линиями электропередачи. Однако в плотно застроенной местности, в районах с тяжёлыми климатическими условиями (часты гололёд, ветры, грозы), с ценными сельскохозяйственными угодьями и т. п. получили распространение кабельные электрические сети, которые выполняются главным образом подземными, а также подводными, в некоторых случаях – надземными.

1.3. Общие сведения о потребителях электрической энергии

В настоящее время отрасли промышленности объединены в следующие комплексы: топливно-энергетический, металлургический, машиностроительный, химико-лесной, агропромышленный, социальный, строительный комплекс и военно-промышленный.

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) включает угольную, газовую, нефтяную, торфяную и сланцевую про-

мышленности, энергетику, отрасли по производству энергетического и других видов оборудования. Все эти отрасли объединены общей целью – удовлетворение потребностей народного хозяйства в топливе, тепле, электроэнергии.

Металлургический комплекс (МК) представляет собой интегрированную систему отраслей черной и цветной металлургии, металлургического, горного машиностроения и ремонтной базы.

Машиностроительный комплекс представляет собой совокупность отраслей машиностроения, металлообработки и ремонтного производства. Ведущими отраслями комплекса являются общее машиностроение, электротехника и радиоэлектроника, транспортное машиностроение, а также производство ЭВМ.

Химико-лесной комплекс представляет собой интегрированную систему химической, нефтехимической, лесной, деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной и лесохимической промышленности, машиностроения и других отраслей.

Агропромышленный комплекс (АПК) характеризуется тем, что в его состав входят разнородные по своей технологии и производственной направленности отрасли экономики: система сельского хозяйства, отрасли перерабатывающей промышленности, комбикормовая и микробиологическая промышленность, сельскохозяйственное машиностроение, машиностроение для легкой и пищевой промышленности. В деятельности АПК принимает прямое или косвенное участие около 80 отраслей. Аграрно-промышленный комплекс можно рассматривать как совокупность технологически и экономически связанных звеньев народного хозяйства, конечным результатом деятельности которых является наиболее полное удовлетворение потребностей населения в продовольствии и непродовольственных товарах, производимых из сельскохозяйственного сырья.

Строительный комплекс включает систему отраслей строительства, промышленность строительных материалов, машиностроение, ремонтную базу.

Социальный комплекс объединяет более чем 20 подотраслей легкой промышленности, которые могут быть объединены в три основные группы: текстильная; швейная; кожевенная, меховая, обувная – производящие товары народного потребления.

Военно-промышленный комплекс (ВПК) представлен отраслями и видами деятельности, ориентированными на удовлетворение потребностей Вооруженных Сил.

2. Основные части энергосистемы: электростанции, межсистемные связи, подстанции, районные электрические сети и местные распределительные сети

2.1. Типы и виды электростанций

Электростанция, электрическая станция, совокупность установок, оборудования и аппаратуры, используемых непосредственно для производства электрической энергии, а также необходимые для этого сооружения и здания, расположенные на определённой территории. В зависимости от источника энергии различают тепловые электростанции, гидроэлектрические станции, гидроаккумулирующие электростанции, атомные электростанции, а также приливные электростанции, ветроэлектростанции, геотермические электростанции и электростанция с магнетогидродинамическим генератором.

Тепловые электростанции (ТЭС) являются основой электроэнергетики; они вырабатывают электроэнергию в результате преобразования тепловой энергии, выделяющейся при сжигании органического топлива. По виду энергетического оборудования ТЭС подразделяют на паротурбинные, газотурбинные и дизельные. Основное энергетическое оборудование современных тепловых паротурбинных электростанций составляют **котлоагрегаты, паровые турбины, турбогенераторы**, а также пароперегреватели, питательные, конденсатные и циркуляционные насосы, конденсаторы, воздухоподогреватели, электрические распределительные устройства.

Паротурбинные электростанции подразделяются на конденсационные электростанции и теплоэлектроцентрали (теплофикационные электростанции).

На конденсационных электростанциях (КЭС) тепло, полученное при сжигании топлива, передаётся в парогенераторе водяному пару, который поступает в конденсационную турбину, внутренняя энергия пара преобразуется в турбине в механическую энергию и затем электрическим генератором в элек-

трический ток. Отработанный пар отводится в конденсатор, откуда конденсат пара перекачивается насосами обратно в парогенератор. КЭС, работающие в энергосистемах СССР, называются также ГРЭС. В отличие от КЭС на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) перегретый пар не полностью используется в турбинах, а частично отбирается для нужд теплофикации. Комбинированное использование тепла значительно повышает экономичность тепловых электростанций и существенно снижает стоимость 1 кВт/ч вырабатываемой ими электроэнергии. В 50–70-х гг. в электроэнергетике появились электроэнергетические установки с газовыми турбинами.

Газотурбинные установки в 25–100 МВт используются в качестве резервных источников энергии для покрытия нагрузок в часы «пик» или в случае возникновения в энергосистемах аварийных ситуаций. Перспективно применение комбинированных парогазовых установок (ПГУ), в которых продукты сгорания и нагретый воздух поступают в газовую турбину, а тепло отработанных газов используется для подогрева воды или выработки пара для паровой турбины низкого давления.

Дизельной электростанцией называется энергетическая установка, оборудованная одним или несколькими электрическими генераторами с приводом от дизелей. На стационарных дизельных электростанциях устанавливаются 4-тактные дизель-агрегаты мощностью от 110 до 750 МВт; стационарные дизельные электростанции и энергопоезда (по эксплуатационным характеристикам они относятся к стационарным электростанциям) оснащаются несколькими дизель-агрегатами и имеют мощность до 10 МВт. Передвижные дизельные электростанции мощностью 25–150 кВт размещаются обычно в кузове автомобиля (полуприцепа) или на отдельных шасси либо на железнодорожной платформе, в вагоне. Дизельные электростанции используются в сельском хозяйстве, в лесной промышленности, в поисковых партиях и т. п. в качестве основного, резервного или аварийного источника электропитания силовых и осветительных сетей. На транспорте дизельные электростанции при-

меняются как основные энергетические установки (дизель-электровозы, дизель-электроходы).

Гидроэлектрическая станция (ГЭС) вырабатывает электроэнергию в результате преобразования энергии потока воды. В состав ГЭС входят гидротехнические сооружения (плотина, водоводы, водозаборы и пр.), обеспечивающие необходимую концентрацию потока воды и создание напора, и энергетическое оборудование (гидротурбины, гидрогенераторы, распределительные устройства и т. п.). Сконцентрированный, направленный поток воды вращает гидротурбину и соединённый с ней электрический генератор.

По схеме использования водных ресурсов и концентрации напоров ГЭС обычно подразделяют на русловые, приплотинные, деривационные, гидроаккумулирующие и приливные. Русловые и приплотинные ГЭС сооружают как на равнинных многоводных реках, так и на горных реках, в узких долинах. Напор воды создаётся плотиной, перегораживающей реку и поднимающей уровень воды верхнего бьефа. В русловых ГЭС здание электростанции с размещёнными в нём гидроагрегатами является частью плотины. В деривационных ГЭС вода реки отводится из речного русла по водоводу (деривации), имеющему уклон, меньший, чем средний уклон реки на используемом участке; деривация подводится к зданию ГЭС, где вода поступает на гидротурбины. Отработавшая вода либо возвращается в реку, либо подводится к следующей деривационной ГЭС. Деривационные ГЭС сооружают главным образом на реках с большим уклоном русла и, как правило, по совмещённой схеме концентрации потока (плотина и деривация совместно).

Гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС) работает в двух режимах: аккумуляирования (энергия, получаемая от других электростанций, главным образом в ночные часы, используется для перекачки воды из нижнего водоёма в верхний) и генерирования (вода из верхнего водоёма по трубопроводу направляется к гидроагрегатам; вырабатываемая электро-

энергия отдаётся в энергосистему). Наиболее экономичны мощные ГАЭС, сооружаемые вблизи крупных центров потребления электроэнергии; их основное назначение – покрывать пики нагрузки, когда мощности энергосистемы использованы полностью, и потреблять излишки электроэнергии в то время суток, когда другие электростанции оказываются недогруженными.

Приливные электростанции (ПЭС) вырабатывают электроэнергию в результате преобразования энергии морских приливов. Электроэнергия ПЭС из-за периодического характера приливов и отливов может быть использована лишь совместно с энергией др. электростанции энергосистемы, которые восполняют дефицит мощности ПЭС в пределах суток и месяца.

Источником энергии на **атомной** электростанции (АЭС) служит ядерный реактор, где энергия выделяется (в виде тепла) вследствие цепной реакции деления ядер тяжёлых элементов. Выделившееся в ядерном реакторе тепло переносится теплоносителем, который поступает в теплообменник (парогенератор); образующийся пар используется так же, как на обычных паротурбинных электростанциях. Существующие способы и методы дозиметрического контроля полностью исключают опасность радиоактивного облучения персонала АЭС.

Ветроэлектростанция вырабатывает электроэнергию в результате преобразования энергии ветра. Основное оборудование станции – ветродвигатель и электрический генератор. Ветровые электростанции сооружают преимущественно в районах с устойчивым ветровым режимом.

Геотермическая электростанция – паротурбинная электростанция, использующая глубинное тепло Земли. В вулканических районах термальные глубинные воды нагреваются до температуры свыше 100 °С на сравнительно небольшой глубине, откуда они по трещинам в земной коре выходят на поверхность. На геотермических электростанциях пароводяная смесь выводится по буровым скважинам и направляется в сепаратор, где пар отделяется от воды; пар поступает в турбины, а горячая вода после химической очистки используется для нужд теплофикации. Отсутствие на гео-

термических электростанциях котлоагрегатов, топливоподачи, золоуловителей и т. п. снижает затраты на строительство такой электростанций и упрощает её эксплуатацию.

Электростанция с **магнитогидродинамическим** генератором (МГД-генератор) – установка для выработки электроэнергии прямым преобразованием внутренней энергии электропроводящей среды (жидкости или газа).

2.2. Электрические сети

Линия электропередачи (ЛЭП), сооружение, состоящее из проводов и вспомогательных устройств, предназначенное для передачи или распределения электрической энергии. ЛЭП, являясь основным звеном энергосистемы, вместе с электрическими подстанциями образует электрические сети.

Электрическая сеть – совокупность устройств, служащих для передачи и распределения электроэнергии от ее источников к электроприёмникам. Электрические сети общего назначения, по которым передается и распределяется около 98% всей вырабатываемой электроэнергии, объединяют электростанции и потребителей электроэнергии в электрические системы, а также системы между собой посредством воздушных и кабельных линий электропередачи (ЛЭП). Электрические сети обеспечивают надёжное централизованное электроснабжение территориально рассредоточенных потребителей при требуемом качестве электроэнергии и высоких экономических показателях. Существуют также электрические сети, не связанные с линиями электропередачи, автономные сети (самолётные, судовые, автомобильные и др.).

Электрические сети можно классифицировать по ряду признаков. Так, по назначению различают: питающие и распределительные сети, служащие соответственно для передачи и распределения электрической энергии от узловых подстанций до электроприёмников (городских, промышленных, сельскохозяйственных и других потребителей). В зависимости от

напряжения электрические сети делят на две группы: до 1 кВ и выше 1 кВ. Кроме того, различают электрические сети по роду тока – сети переменного и постоянного тока; по исполнению – воздушные и кабельные сети; по конфигурации – кольцевые и радиальные; по режиму нормальной работы – разомкнутые и замкнутые и т. д. Кроме линий электропередачи, в состав электрической сети входят подстанции электрические для преобразования, распределения электроэнергии и управления режимом работы сети (повышения и понижения напряжения, преобразования трёхфазного переменного тока в постоянный и наоборот, изменения числа отходящих линий по сравнению с числом подходящих и т. д.). Понижение (или повышение) напряжения происходит обычно несколькими ступенями. Каждой ступени напряжения соответствует своя сеть линий электропередачи и электрических подстанций, через которые электрическая энергия поступает в сеть следующей ступени напряжения. Электрические сети получаются как бы многоярусными, состоящими из ряда взаимосвязанных сетей различного напряжения.

Быстрое развитие и совершенствование ЛЭП обусловлены созданием развитых электрических сетей и объединением их в электроэнергетические системы. Различают воздушные ЛЭП, провода которых подвешены над землёй или над водой, и подземные (подводные) ЛЭП, в которых используются главным образом силовые кабели. По воздушным ЛЭП электрическая энергия передаётся на значительные расстояния по проводам, прикрепленным к опорам (столбам) с помощью изоляторов. Воздушные ЛЭП являются одним из основных звеньев современных энергосистем. Напряжение в линии зависит от её протяжённости и передаваемой по ней мощности. Для воздушных ЛЭП применяют неизолированные провода (однопроволочные, многопроволочные и полые) из меди, алюминия, сталеалюминия, реже стальные (главным образом при электрификации сельских местностей).

Важнейшие характеристики воздушных ЛЭП: L – длина пролёта линии (расстояние между соседними опорами); f – наибольшая стрела провеса провода в пролёте; h – наименьшее

(габаритное) допустимое расстояние от низшей точки провода до земли; l – длина гирлянды изоляторов; a – расстояние между соседними проводами (фазами) линии; H – полная высота опоры. Конструктивные параметры воздушной ЛЭП зависят от номинального напряжения линии, от рельефа и климатических условий местности, а также от технико-экономических требований. Допустимое расстояние от низшей точки провода до земли составляет в ненаселённой местности 5–7 м, а в населённой 6–8 м.

На воздушных ЛЭП применяют различные по конструкции опоры. Провода воздушных ЛЭП должны обладать хорошей проводимостью, механической прочностью, стойкостью против атмосферных и химических воздействий. Опоры линий электропередачи, конструкции для подвески проводов и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи (ЛЭП). Основные конструктивные элементы опоры линий электропередачи: стойки, фундаменты, траверсы, тросостойки и оттяжки. Различают анкерные и промежуточные опоры линий электропередачи. Жёсткая и прочная конструкция анкерных опор выдерживает значительные усилия от натяжения проводов. Анкерные опоры линий электропередачи устанавливают в начале и в конце ЛЭП, на поворотах, при переходах через водные преграды и в горах (т. н. переходные опоры линий электропередачи). Промежуточные опоры имеют менее прочную конструкцию; они служат главным образом для поддержания проводов и тросов на прямых участках трассы ЛЭП. Опоры линий электропередачи подразделяют также на транспозиционные (для изменения порядка расположения фаз), ответвительные, перекрёстные, повышенные, пониженные и др. По числу подвешиваемых проводов (цепей) опоры линий электропередачи разделяют на одно- и многоцепные; по конструкции – на одностоечные, А-, П- и АП-образные, свободностоящие, с оттяжками. Устанавливают опоры на железобетонных фундаментах или непосредственно в грунте. Для защиты воздушных ЛЭП от атмосферных перенапряжений, возникающих при грозовых разрядах в линию или

вблизи неё, применяют грозозащитные тросы или разрядники, которые устанавливают на ЛЭП с напряжением до 35 кВ.

2.3. Распределительные электрические сети 0,38–20 кВ

К распределительным электрическим сетям напряжением 0,38–20 кВ сельскохозяйственного назначения (в дальнейшем по тексту – объектов) относятся:

- линия электропередачи напряжением 0,38 кВ;
- трансформаторная подстанция 6–20/0,4 кВ;
- распределительный пункт 6–20 кВ;

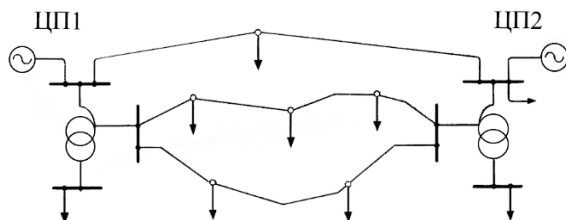


Рис. 2.1. Сложно-замкнутая конфигурация сети двух номинальных напряжений

Распределительные сети НН 0,38–35 кВ выполняют преимущественно разомкнутыми радиальной и магистральной конфигурации, получающими питание от одного или двух центров (рис. 2.1). В отдельных случаях эти сети сооружаются как замкнутые, но эксплуатируемые в разомкнутом режиме (например, в городских сетях). В этих схемах при нарушении питания по одной из линий включается резервный участок-перемычка, который в нормальном режиме разомкнут. При этом электроснабжение осуществляется через резервный участок до восстановления поврежденной ЛЭП. Главная особенность распределительных сетей НН – их массовость. Количество трансформаторных пунктов, участков сетей достигает в пределах сетевого предприятия несколько сотен. Поэтому в этих сетях для изменения, улучшения режима напряжения используют простые недорогие устройства:

трансформаторы без автоматического регулирования и преимущественно нерегулируемые конденсаторные батареи. Распределительные сети НН и особенно сети 0,38–10 кВ, сильно разветвленные, характеризуются большой суммарной протяженностью. Для уменьшения отрицательного влияния перетоков реактивной мощности, вызванных низким значением естественного коэффициента мощности основной массы потребителей, экономически целесообразна высокая или полная ее компенсация с помощью конденсаторных батарей. Схемное построение и функционирование распределительных сетей определяется требуемой надежностью электроснабжения, отраслевой принадлежностью, характером потребителей.

2.4. Воздушные линии электропередачи с неизолированными проводами межсистемных, районных и местных электрических сетей

Основные термины и определения по ВЛ

Воздушной линией электропередачи (ВЛ) называется устройство для передачи и распределения электроэнергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикрепленным при помощи изоляторов и арматуры к опорам или кронштейнам, стойкам на зданиях и инженерных сооружениях (мостах, путепроводах и т.п.).

Ответвлением от магистральной части ВЛ называется участок проводов от опоры магистральной части ВЛ до конца ответвления.

Ответвлением от ВЛ к вводу называется участок проводов от опоры ВЛ до ввода в подстанцию 35 кВ и выше, в РП, в ТП или в здание.

Нормальным режимом ВЛ называется состояние ВЛ при необорванных проводах и тросах и неповрежденных опорах.

Аварийным режимом ВЛ называется состояние ВЛ при оборванных одном или нескольких проводах или тросах, или при поврежденных опорах.

Для воздушных линий могут применяться следующие типы опор.

Анкерными называются опоры, устанавливаемые на пересечениях с различными сооружениями и в местах изменения количества, марок и сечений проводов (они должны иметь жесткую конструкцию и воспринимать в нормальном режиме усилия от разности тяжения проводов вдоль ВЛ).

Промежуточными называются опоры, устанавливаемые на прямых участках трассы (они не должны воспринимать усилия, направленные вдоль ВЛ).

Угловыми называются опоры, устанавливаемые в местах изменения направления трассы (в нормальном режиме они должны воспринимать слагающую сил тяжения проводов смежных пролетов).

Концевыми называются опоры, устанавливаемые по концам ВЛ (они являются разновидностью анкерных опор и в нормальном режиме должны воспринимать одностороннее тяжение проводов).

Ответственными и перекрестными называются опоры, на которых выполняются ответвления от ВЛ и пересечения ВЛ двух направлений.

Стрела провеса провода – расстояние по вертикали от нижней точки провода до прямой линии, соединяющей точки подвеса провода на соседних опорах до земли при установке опор на идеальной ровной поверхности.

Габаритной стрелой провеса провода называется наибольшая допускаемая по нормам стрела провеса в габаритном пролете.

Нормируемые расстояния на ВЛ – кратчайшие расстояния по прямой между натянутым проводом и землей или расположенным под проводом сооружением, а также расстояние от провода до тела опоры или до какого-либо сооружения и расстояние между проводами.

Тяжением провода называется усилие, с которым провод натянут и закреплен на опорах.

Анкерованным называется участок линии между двумя соседними анкерными опорами. Анкерванный участок состоит из нескольких пролетов с промежуточными опорами (простыми, угловыми, ответвительными, ответвительно-угловыми и др.). Анкерные опоры принимают на себя полное тяжение провода и различаются на собственно анкерные, устанавливаемые на прямых участках линии, на угловые, устанавливаемые в углах поворота линии, и на концевые, устанавливаемые на концах линии.

Пролет, ограниченный двумя смежными анкерными опорами, устанавливаемыми, как правило, на переходах через железные и автомобильные дороги и другие ответственные сооружения, называется **анкерным пролетом**.

За начало ВЛ следует принимать линейные выводы распределительных устройств или подстанций, а для ответвлений – место ответвления, за конец – конечные опоры линий и их ответвлений, а также дополнительные опоры у вводов к потребителям.

Населенной местностью называются земли городов в пределах городской черты в границах их перспективного развития на 10 лет, пригородные и зеленые зоны, курорты, земли поселков городского типа в пределах поселковой черты и сельских населенных пунктов в пределах черты этих пунктов.

Ненаселенной местностью называются незастроенные местности, хотя бы и часто посещаемые людьми, доступные для транспорта и сельскохозяйственных машин, сельскохозяйственные угодья, огороды, сады, местности с отдельными стоящими строениями и временными сооружениями.

Монтажным (ремонтным) участком линии называется несколько смежных промежуточных пролетов линии, выделенных для натяжения (замены) проводов в случае значительной длины анкерванного участка.

Линейной арматурой опор и проводов линии называются металлические детали, служащие для крепления изоляции ВЛ, деталей опор между собой, для соединения концов прово-

дов между собой, для крепления проводов к изоляторам или изоляторов к опорам и для защиты проводов от повреждения их вибрацией.

Запасом прочности отдельных элементов линии называются отношение величины нагрузки, разрушающей элемент, к величине нормально действующей нагрузки (подсчитанной для наиболее тяжелых условий).

Участок ВЛ, заключенный между двумя соседними опорами, называется **пролетом**.

Габаритным называется пролет между двумя смежными промежуточными или между анкерной и смежной с ней промежуточной опорой, у которого при ровном профиле поверхности земли расстояние от провода до земли в середине пролета при наибольшем провисе провода равно нормированному допустимому значению.

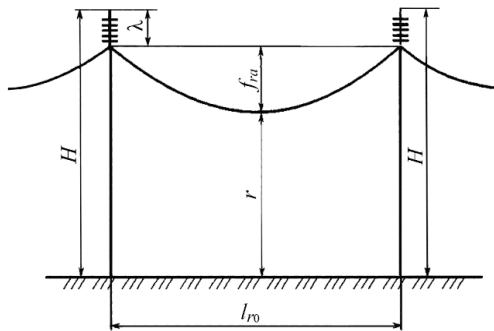


Рис. 2.2. Схема габаритного пролета

Назначение и конструкции воздушных линий

Конструкции воздушных линий и, особенно их опор, должны соответствовать реальным условиям их работы и местным климатическим условиям.

Конструкции ВЛ определяются проектом, в котором указываются их номинальные напряжения и марки проводов с учетом метеорологических условий на трассе линии.

Проектирование конструктивной части ВЛ состоит в выборе типовых опор. При этом определяют: механические

нагрузки на провода и грозозащитные тросы, а также их допустимые механические напряжения; габаритные размеры пролетов; стрелы провеса проводов в пролете при различных климатических условиях работы линии; расстановку опор и сечение проводов в пролетах пересечения линий с естественными преградами и техническими сооружениями.

Провода крепятся изоляционными элементами к конструкциям, именуемыми опорами ВЛ. В качестве опор используются специально созданные для этой цели конструкции, а в отдельных случаях – конструкции, имеющие другое основное назначение, например, эстакады, мосты, дымовые трубы, здания и т. п. Конструкция ВЛ в значительной степени зависит от номинального напряжения электрической сети переменного тока.

Воздушные линии напряжением до 1 кВ называются линиями низкого напряжения (НН), 1 кВ и более – высокого напряжения (ВН).

Основными элементами ВЛ являются: провода, по которым передается электрическая энергия, изоляционные устройства, опоры и основания опор.

Низковольтные линии представляют собой простейшие сооружения в виде одиночных столбов, заглубленных непосредственно в землю, с укрепленными на них металлическими штырями и изоляторами, к которым прикреплены провода. Линии ВН 3–10 кВ принципиально не отличаются от линий НН, однако благодаря большим расстояниям между фазами и между проводами и землей размеры элементов – столбов, штырей, изоляторов – увеличены. Линии ВН 35 кВ и выше конструктивно более сложны. Это связано с применением более тяжелых проводов, большими размерами изоляционных конструкций и большими расстояниями между фазами и между проводом и землей. В большинстве случаев изоляционные устройства на таких линиях крепятся на специальных траверсах, а сама изоляция выполняется составной из нескольких элементов, образующих подвесную конструкцию. Более сложными для таких линий являются кон-

струкции опор и их оснований, представляющие собой составленные из отдельных простых элементов фермы, порталы и другие конструктивные схемы.

В зависимости от способа закрепления провода на опоре различаются два типа изоляционных устройств и два типа опор. На опорах III и IV провода подвешены к вертикальным изолированным подвескам, именуемым *поддерживающими*.

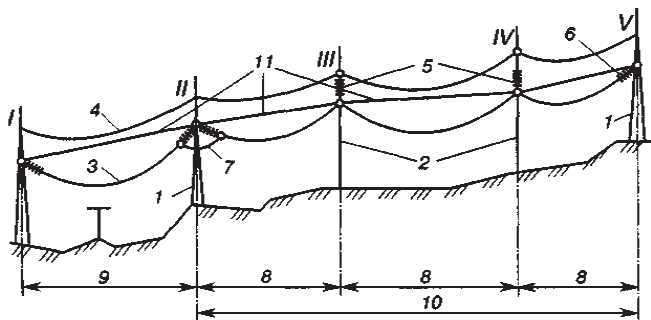


Рис. 2.3. Схема участка ВЛ: 1 – анкерная опора; 2 – промежуточная опора; 3 – провод; 4 – молниезащитный трос; 5 – поддерживающая подвеска; 6 – натяжная подвеска; 7 – шлейф; 8 – пролет; 9 – анкерный пролет; 10 – анкерный участок; 11 – наклонный пролет

Опоры, на которых провод подвешен к поддерживающим подвескам, называются *промежуточными*, а опоры с натяжными подвесками – *анкерными*. Участок провода, заключенный между концами натяжных подвесок, называют *шлейфом*. Шлейф должен быть удален от заземленных частей опор на достаточное расстояние, исключающее перекрытие с проводом на опору.

Если в одном из пролетов, смежном с промежуточной опорой, произойдет обрыв провода или изменение внешних нагрузок, то под воздействием возникшей разности тяжений в пролетах поддерживающая подвеска отклонится в сторону пролета с большим тяжением.

В пролетах, примыкающих к анкерной опоре, провод другого смежного пролета не реагирует на изменение тяжения первого,

так как точки крепления натяжных подвесок каждого пролета независимы, а сама анкерная опора неподвижна. Вследствие этого основное назначение анкерных опор – преграждать распространение влияния изменившегося состояния провода на участке ВЛ, расположенном с одной стороны от анкерной опоры, на участок, расположенный с противоположной стороны опоры.

На ВЛ с креплением провода на штыревых изоляторах провод закрепляется неподвижно не только на анкерных опорах, но и на промежуточных, однако с конструктивным отличием. Крепление на анкерной опоре обеспечивает неизменность положения провода в одном смежном пролете при любом изменении тяжения в другом вплоть до обрыва, а на промежуточной опоре – только изменение тяжения до определенного значения, после превышения которого происходит разрушение узла крепления.

Опоры ВЛ

По мере развития науки и техники и накопления опыта унифицированные опоры и фундаменты совершенствуются, создаются новые, более эффективные решения. Поэтому номенклатура и каталоги унифицированных опор и фундаментов время от времени обновляются, в них включаются новые прогрессивные конструкции и исключаются устаревшие. Существует каталог унифицированных опор, в котором содержатся деревянные, стальные и железобетонные опоры ВЛ 35–750 кВ и опоры для больших переходов ВЛ 35–500 кВ. Этот каталог разработан Северо-Западным отделением института «Энергосетьпроект».

В этом каталоге приведены эскизы с основными размерами, показателями расходов материалов, область применения и номера монтажных схем (инвентарные номера типовых проектов и чертежей) унифицированных и типовых опор. Каждая унифицированная и типовая опора имеет свой шифр. При этом шифры опор ВЛ 35–330 кВ имеют следующие структуры.

Шифр начинается с группы букв, в которых буквы обозначают:

П или ПС – промежуточная опора;

ПУ или ПУС – промежуточная угловая опора;