

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет
им. И. И. Ползунова»

В. И. Сташко

Воздушные и кабельные линии электропередачи

Учебно-методическое пособие



ООО «МЦ ЭОР», Барнаул - 2019

УДК.621.311

ББК 22.332

Сташко В. И. Воздушные и кабельные линии электропередачи [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие к практическим занятиям и самостоятельной работе студентов / В. И. Сташко. – Барнаул : ООО «МЦ ЭОР», 2019. – Режим доступа: <http://stashko.ru/19005> – 25.02.2019. – Загл. с экрана.

В учебно-методическом пособии представлены дополнительные материалы у изучения дисциплины «Воздушные и кабельные линии электропередачи», указания к самостоятельной работе студентов при подготовке к лекционным, и задания к практическим занятиям. Учебно-методическое пособие предназначено для бакалавров направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения, обучающихся по профилю «Электроэнергетические комплексы и системы».

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Протокол заседания кафедры № 7 от 24.01.2019 г.

© Сташко В. И., 2019

© ООО «МЦ ЭОР», 2019

ВВЕДЕНИЕ

Содержание данного учебно-методического пособия соответствуют рабочей программе дисциплины «Воздушные и кабельные линии электропередачи», и предназначено для студентов, обучающихся по направлению электроэнергетика и электротехника.

Издание ориентировано на изучение теоретического материала по дисциплине «Воздушные и кабельные линии электропередачи», с использованием его в процессе выполнения самостоятельной работы при подготовке к практическим и лекционным занятиям.

Данное учебно-методическое пособие дает студентам возможность получить знания в области определения параметров оборудования воздушных и кабельных линий, научиться рассчитывать их параметры по существующей в настоящее время методике.

Основной целью практических занятий и самостоятельной работы студентов по дисциплине «Воздушные и кабельные линии электропередачи» является:

1. Получение более глубоких и расширенных знаний по изучаемой учебной дисциплине с целью определения основных параметров оборудования воздушных и кабельных линий и расчета их параметров.
2. Приобретение знаний и умений по данной учебной дисциплине, в строгом соответствии с требованиями ФГОС ВО.
3. Формирование компетенций, необходимых в профессиональной деятельности, которые позволяют использовать и применять познавательные, практические, и научно-исследовательские методы при решении различных инженерно-технических задач.
4. Развитие у студентов профессионально значимых качеств и способностей, позволяющих самостоятельно формулировать и решать возникающие проблемы, находить решения в различных, в том числе конфликтных ситуациях, толерантность и др.).

В рамках изучения дисциплины «Воздушные и кабельные линии электропередачи» проводятся практические занятия по следующим, основным темам:

Тема 1. Конструктивные особенности воздушных (ВЛ) и кабельных линий (КЛ), методы расчета и моделирование их параметров.

Тема 2. Определение технического состояния линий электропередачи (ЛЭП) и элементов их конструкции. Классификация ВЛ и КЛ, выбор типа и конструктивного исполнения ЛЭП различного уровня номинального напряжения.

Тема 3. Расчет конструктивной части ЛЭП. Причины повреждаемости ВЛ и КЛ. Повышение надежности ВЛ. Определение физико-механических характеристик сталеалюминевых проводов, расчетов проводов и грозозащитных тросов.

На практических занятиях, согласно основным темам, отрабатывается методика расчета воздушных и кабельных линий электропередачи, студенты получают практические знания по проектированию различных элементов и частей конструкции воздушных и кабельных ЛЭП и проверять их надежность к различным режимам работы (нормальные и аварийные режимы).

Каждая из трех тем содержит по несколько вопросов:

Тема 1.

1.1 Расчет погонных параметров (длины провода) и сечения провода воздушной ЛЭП с заданными напряжением и протяженностью.

1.2 Расчет погонных параметров воздушных линий заданного напряжения при использовании различных типов опор.

1.3 Расчет погонных параметров (длины) КЛ.

1.4 Определение основных технико-экономических характеристик и параметров схем замещения ВЛ и КЛ одного класса напряжения, с одинаковыми значениями протяженности и сечения токоведущих жил.

1.5 Расчет пропускной способности ЛЭП, с учетом особенности конструкции и выбора оптимальных параметров.

Тема 2.

2.1 Определение конструктивных параметров ЛЭП с заданными параметрами схемы замещения и нагрузки.

2.2 Расчет максимальных потерь в трехфазной сети 0,4 кВ, выполненной в виде ВЛ и КЛ.

2.3 Расчет падения напряжения в ВЛ.

2.4 Расчет падения напряжения в КЛ.

2.5 Расчет нагрузочной способности ЛЭП в зависимости от марки и сечения токоведущих жил.

2.6 Расчет мощности и места установки компенсирующих устройств (конденсаторных батарей) для снижения потерь по напряжению.

Тема 3.

3.1 Расчет воздушных и кабельных ЛЭП с заданным сечением токоведущих жил, для построения электрических сетей.

3.2 Определение потерь электроэнергии в ВЛ и КЛ за установленный период эксплуатации.

3.3 Построение схемы расстановки опор ВЛ по профилю трассы ЛЭП.

3.4 Расчет механических нагрузок на элементы конструкции ВЛ.

3.5 Выбор изоляторов и линейной арматуры ВЛ.

3.6 Расчет тяжения провода одного или более пролетов ВЛ.

1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ВОПРОСЫ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

1.1 Энергосистема и электрические сети

Энергосистема России состоит из объединенной энергосистемы (ОЭС) и энергосистемы, которая состоит из территориально изолированных энергосистем. В ОЭС входят энергосистемы Центра, Юга, Средней Волги, Северо-Запада, Урала и Сибири). К территориально изолированным энергосистемам относятся энергосистемы северной и центральной части Республики Саха (Якутия), Чукотского автономного округа, Сахалинской и Магаданской областей, Камчатки, а также Николаевский и Норильско-Таймырский и энергорайоны.

В общем виде, энергосистема - это совокупность различных энергетических ресурсов, которые связаны между собой, и осуществляют производство электроэнергии, её преобразование, передачу и распределение между потребителями посредством электрических сетей.

Электрические сети – это неотъемлемая часть электроэнергетической системы, которая осуществляет передачу сгенерированной электростанциями мощности на расстояние, её преобразование на подстанциях, и распределение на всей территории страны.

Электрические сети имеют достаточно сложную конфигурацию, характеризуются многоступенчатостью, и могут иметь различные режимы работы. Многоступенчатые могут насчитывать десятки, и даже сотни узлов и ответвлений, питающих самые разнообразные как по режиму работы, так и по мощности потребители.

По напряжению, в настоящее время электрические сети стандартизованы по двум группам: до 1000 В и выше 1000 В. К первой группе относятся напряжения 40, 220, 380 и 660 В. Ко второй группе - 3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ. Данные значения напряжения соответствуют линейным значениям, т.е., междуфазным значениям напряжения трехфазной сети переменного тока. Классификация электрических сетей по номинальному напряжению представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Классификация электрических сетей по напряжению

Номинальное напряжение	НН ниже 1 кВ	СН 3-35 кВ	ВН 110-220 кВ	СВН 330-750 кВ	УВН 1150
Уровень сети	Местные		Районные	Региональные	
Назначение	Распределительные			Системообразующие	
Потребители	Промышленность, города, сельское хозяйство и др.			—	

Согласно данным ПАО «Россети», передача и распределение электроэнергии по всей территории России осуществляется магистральной сетевой компанией ПАО «ФСК ЕЭС» и одиннадцатью межрегиональными сетевыми компаниями.

ФСК ЕЭС обеспечивает работу более 143 тыс. километров высоковольтных магистральных ЛЭП и 947 подстанций, установленная мощность которых составляет более 347 тыс. МВА. В результате, сетевая компания осуществляет надежную поставку электроэнергии в 77 российских регионов с общей площадью более 15 миллионов квадратных километров [2].

1.2 Воздушные линии электропередачи

Воздушные линии электропередачи предназначены для передачи и распределения электрической энергии по проводам, которые находятся на открытом воздухе. Они прикрепленным с помощью специальных кронштейнов (траверс), изоляторов и прочей арматуры к опорам. Опоры одноцепных ВЛ рассчитаны на подвеску трёх фазных проводов (одной цепи), а опоры двухцепных ВЛ имеют шесть проводов, т.е., две параллельные трехфазные цепи. Кроме того, в самой верхней части опоры, над фазными проводами может быть установлен грозозащитный трос. В сетях до 1000 В с глухозаземлённой нейтралью, помимо трех фазных проводов имеется четвертый - нулевой провод.

Воздушная ЛЭП состоит из опор, проводов, траверс, изоляторов, арматуры, грозозащитного троса, разрядников, заземления и секционирующего устройства. В состав ЛЭП могут также входить и линии связи, как в виде отдельных волоконно-оптических линий, так и встроенных в силовой провод или грозозащитный трос. Также, ВЛ имеет вспомогательное оборудование, которое необходимо в процессе эксплуатации. К такому оборудованию относится аппаратура высокочастотной связи, отбора мощности и т.д. Некоторые воздушные ЛЭП имеют систему маркировки опор и высоковольтных проводов для обеспечения безопасности полётов воздушных судов.

Для соединения отдельных энергосистем используются дальние межсистемные ВЛ с напряжением 500 кВ и выше. Магистральные линии имеют напряжение 220, 330, и 500 кВ, и предназначены для связи энергосистем и объединения электростанций внутри энергосистемы. Например, они могут соединять электростанции с мощными узловыми подстанциями.

Распределительные ВЛ имеют напряжение 110, 150 и 220 кВ, и предназначены для электроснабжения предприятий и городов. Они соединяют узловые подстанции с подстанциями глубокого ввода промышленных предприятий и городов.

Для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, применяются, как правило, ВЛ напряжением 35 кВ. А современная городская распределительная сеть имеет напряжение в 10 кВ. Ранее, в городах и на промышленных предприятиях вместо 10 кВ применялось напряжение 3-6 кВ, но, в связи с разви-

тием распределительных сетей, увеличением их протяженности, и, соответственно увеличения потерь, сетевые компании переходят на более высокое напряжение.

Как уже отмечалось выше (таблица 1), ЛЭП переменного тока классифицируются по напряжению следующим образом:

- НН – низкое напряжение (до 1000 В);
- СН – среднее напряжение (1-35 кВ);
- ВН – высокое напряжение (110-330 кВ);
- СВН – сверхвысокое напряжение (500-750 кВ);
- УВН – ультравысокое напряжение (выше 750 кВ).

Для ЛЭП постоянного тока напряжение не регламентировано. Но, наиболее часто используется напряжение 150, 400 и 800 кВ.

Трёхфазные сети могут быть выполнены с незаземленной (изолированной) нейтралью, с резонансно-заземлённой (компенсированной) нейтралью, с эффективно-заземлённой нейтралью и с глухозаземлённой нейтралью.

В сетях с незаземлённой (изолированной) нейтралью, нейтраль не присоединена к заземляющему устройству или присоединена к нему через достаточно большое сопротивление. Такой режим нейтрали используется чаще всего в сетях с напряжением до 35 кВ и малыми токами замыкания фазы на землю.

В сети с резонансно-заземлённой (компенсированной) нейтралью, нейтральная шина соединяется с заземлением через индуктивность. Такие режимы используются также в сетях с напряжением до 35 кВ, но, с достаточно большими токами замыкания фазы на землю.

Трёхфазные сети с эффективно-заземлённой нейтралью, это сети высокого и сверхвысокого напряжения. В таких сетях нейтраль соединена с землёй либо непосредственно, либо через небольшое сопротивление.

Сети с глухозаземлённой нейтралью, это сети с напряжением ниже 1 кВ или 220 кВ и выше. В таких сетях, нейтраль генератора или трансформатора присоединяется к заземлению непосредственно или через малое сопротивление.

Основными элементами, которые характеризуют ВЛ являются:

- положение оси линии на земной поверхности (трасса);
- отрезки, на которые разбита трасса (пикеты), длина которых зависит от номинального напряжения и типа местности;
- начало трассы обозначает нулевой пикетный знак;
- пролёт – это расстояние между центрами двух опор, на которых подвешены провода;
- переходный пролёт – это пролёт, пересекающий какое-либо естественное или искусственное препятствие;
- угол поворота линии – это угол α между направлениями трассы в смежных пролётах;
- стрела провеса – это вертикальное расстояние между низшей точкой провода в пролёте и прямой, соединяющей точки его крепления на опорах;

– габариты провода – это вертикальное расстояние от провода в пролёте до поверхности земли (воды) или пересекаемых трассой инженерных сооружений.

– шлейф (петля) – это отрезок провода, соединяющий на анкерной опоре натянутые провода соседних анкерных пролётов.

При проектировании, строительстве, и эксплуатации ВЛ, первостепенное внимание уделяется обеспечению надежной и эффективной работы. Широко применяются такие элементы конструкций и оборудования, которые сохраняют заданные расчетные параметры, что обеспечивает надёжность ЛЭП в течение всего срока службы. Кроме того, для воздушных ЛЭП 110 кВ и выше, которые не имеют круглогодичного доступа для проведения технического обслуживания и ремонта, применяются специальные технические решения, обеспечивающие повышенную надежность ВЛ и минимизацию затрат в процессе эксплуатации.

Монтаж воздушных ЛЭП осуществляется так называемым методом «подтяжением». Это особенно актуально в случае сложного рельефа местности. При подборе оборудования для монтажа ВЛ электропередачи, необходимо учитывать количество проводов в фазе, их диаметр и максимальное расстояние между опорами.

1.3 Кабельные линии электропередачи

Кабельная линия электропередачи – это линия для передачи электроэнергии, состоящая из одного или нескольких параллельных кабелей. Кабельные ЛЭП прокладывают в тех местах, где строительство ВЛ невозможно, неприемлемо по условиям техники безопасности или нецелесообразно по архитектурно-планировочным показателям, экономическим и прочим требованиям.

Наибольшее распространение КЛ получили в распределительных сетях промышленных предприятий и городов. Для передачи электрической энергии через большие водные пространства, также, КЛ нет альтернативы.

В сравнении с воздушными ЛЭП, кабельные линии имеют ряд достоинств и преимуществ. Так, КЛ не подвержены воздействию окружающей среды, имеют меньшую повреждаемость, они компактны и скрыты от посторонних лиц. Вместе с тем, КЛ в несколько раз дороже ВЛ того же класса напряжения, их сложнее сооружать (прокладывать) и эксплуатировать.

Классификация КЛ по напряжению аналогична классификации ВЛ. Но, в отличие от ВЛ, они подразделяются по условиям прохождения и типу изоляции.

По условиям прохождения КЛ разделяют на подземные, подводные и проходящие по сооружениям. Изоляция КЛ может быть двух типов, жидкостная и твердая. Жидкостная изоляция – это изоляция, представляющая из себя кабельное нефтяное масло. Твердая изоляция бывает следующих видов:

- бумажно-масляная;
- сшитый полиэтилен (XLPE);
- поливинилхлоридная (ПВХ);

- этиленпропиленовая резина (EPR);
- резино-бумажная (RIP).

Кроме того, существуют и другие виды изоляции, например, газообразная или комбинированная, жидкостная и твёрдая из специальных материалов. Но из-за редкого применения таких типов изоляции, в настоящее время они не рассматриваются.

Для КЛ могут быть возведены специальные кабельные сооружения. К кабельным сооружениям относятся: кабельный тоннель, кабельный канал, кабельный блок, кабельная эстакада, кабельная галерея, кабельная шахта, кабельный этаж и др.

Кабельная ЛЭП состоит из, непосредственно, самого кабеля, соединительных и концевых муфт, элементов крепления и прочих конструкций, связанных с особенностями прокладки КЛ.

Кабель состоит из изолированных токоведущих жил, которые заключены в герметичную защитную оболочку, предохраняющую их от воздействия влаги, агрессивной среды и механических повреждений. Силовые кабели, как правило, имеют от одной до четырех жил сечением 1,5-2000 мм². Токоведущие жилы выполнены из алюминия или меди, и могут быть однопроволочными (сечение до 16 мм²) и многопроволочными (сечение выше 16 мм²). По форме жилы бывают круглые, секторные и сегментные.

Четырехжильные кабели применяются, как правило, в электрических сетях с напряжением не более 1 кВ. Кабели на напряжение 6-35 кВ изготавливаются трехжильными, а на напряжение 110-220 кВ – одножильными.

Защитные оболочки кабелей изготавливаются из полихлорвинила, свинца, алюминия и резины. В кабелях каждая из токоведущих жил может быть дополнительно покрыта свинцовой оболочкой. Такая конструкция позволяет значительно улучшить теплоотвод, и создает более равномерное электрическое поле.

Защитная броня кабеля изготавливается из стальной ленты или оцинкованной проволоки. Защита металлической брони от коррозии осуществляется путем нанесения специального наружного покрова, как правило, пропитанного битумом и покрытого меловым составом.

Особое внимание в конструкции кабелей уделяется электрической изоляции. В кабелях на напряжение до 35 кВ, для повышения прочности электрической изоляции, между жилами и оболочкой могут находиться дополнительные слои поясной изоляции. В кабелях напряжением от 110 кВ, повышение прочности бумажной изоляции осуществляется путем их наполнения маслом или газом под давлением. Такие кабели называют маслонаполненными или газонаполненными.

Способы прокладки КЛ определяется условиями трассы. Кабельные ЛЭП, часто (особенно на территории предприятий и городов) прокладываются в земляных траншеях, реже, как было указано выше, в специальных кабельных сооружениях. При прокладке в траншеях, для предотвращения повреждения кабеля из-за прогибов, на дно траншеи укладывают подушку из песка или просеянной

земли. В случае, если при прокладке в одну траншею нескольких КЛ с напряжением не более 10 кВ, расстояние между ними должно составлять не менее 100 мм, а между кабелями напряжением 20-35 кВ – не менее 250 мм. Уложенный в траншею кабель, сначала засыпается небольшим слоем грунта, после чего, сверху его закрывают кирпичом или бетонными плитами с целью защиты от возможных механических повреждений. После этого, траншея полностью засыпается грунтом.

В местах прохода КЛ через автомобильные дороги, а также и на вводе в здание, кабель помещают в трубы из асбестоцемента или других негорючих и прочных материалов. Таким образом, кабель защищается от вибраций, а в случае ремонта отсутствует необходимость вскрытия полотна дороги.

В настоящее время, основными задачами, которые необходимо решать при проектировании, строительстве реконструкции или в процессе эксплуатации КЛ являются [3]:

- модернизация сетей и повышение их энергоэффективности с целью обеспечения надежности работы сетей на основе инновационного подхода к развитию и модернизации действующего сетевого комплекса;

- применение кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) и арматуры КЛ, полученных на высокотехнологичных производствах, гарантирующих низкую дефектность производимых кабелей и являющихся ключевым фактором надежности;

- использование кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена для замены маслонеполненных кабелей и кабелей с пропитанной бумажной изоляцией;

- применение КЛ постоянного тока;

- снижение эксплуатационных издержек;

- развитие технологий оценки технического состояния КЛ, мониторинга режимов работы и состояния изоляции без вывода КЛ из работы.

2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОЗДУШНЫХ И КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ, МЕТОДЫ РАСЧЕТА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ

2.1 Расчет погонных параметров и сечения провода воздушной ЛЭП с заданными напряжением и протяженностью

Активное сопротивление ВЛ с частотой тока 50 Гц, при использовании обычных алюминиевых или медных проводов, можно принять равным погонному, т.е. омическому сопротивлению. Данное допущение справедливо для сечений проводов не более 500 мм². В случае, если диаметр сечения проводов больше, то в расчетах необходимо учитывать явление поверхностного эффекта.

Основными факторами, которые оказывают влияние на активное сопротивление линии, являются материала провода и его температура, которая зависит от тока нагрузки и температуры окружающей среды.

Проходящий по линии ток рассчитывается по следующей формуле:

$$I = S_{max}/(\sqrt{3} \cdot U_{ном}), \quad (1)$$

где $U_{ном}$ – напряжение ВЛ, а S_{max} – максимальная мощность.

Активное сопротивление определяется по формуле:

$$R_{л} = R_{о} \cdot L \quad (2)$$

где $R_{о}$ – удельное сопротивление (Ом· мм²/км), L – длина линии (км), при температуре провода + 20 С°.

Расчет сечения провода производится по экономической плотности тока. При уменьшении сечения провода, уменьшаются затраты на строительство ВЛ, но, при этом, возрастают потери электроэнергии. Величина потерь прямо пропорциональна потерям активной мощности, и обратно пропорциональна площади поперечного сечения провода.

Значения экономической плотности тока (А/мм) приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Экономическая плотность тока

Проводники	Плотность тока при заданном числе часов использования максимума нагрузки, А/мм ²		
	1000–3000	3000–5000	Более 5000
Медные	2.5	2.1	1.8
Алюминиевые или сталеалюминиевые	1.3	1.1	1

Расчет поперечного сечения провода ВЛ определяется в зависимости от значения экономической плотности тока I_3 .

$$S_3 = \frac{I_{max}}{I_3} \quad (3)$$

На выбор сечения провода, также могут оказывать влияние следующие технические факторы:

- нагрев от длительного воздействия максимальным током или от тока короткого замыкания (КЗ);
- механическая прочность – способность ветер, гололед, и собственную массу;
- коронирование – фактор, который зависит главным образом от применяемого напряжения и окружающей среды.

2.2 Расчет погонных параметров воздушных линий заданного напряжения при использовании различных типов опор

Воздушные ЛЭП напряжением до 1 кВ (НН) называют низковольтными линиями. Они представляют собой простейшее сооружение, состоящее из одиночных опор (столбов), в верхней их части, на специальных металлических штырях установлены изоляторы, к которым крепятся провода. Опоры в низковольтных ЛЭП применяют деревянные, железобетонные или металлические.

Линии 3-10 кВ (ВН), фактически не отличаются от линий НН, за исключением увеличенных размеров опор и изоляторов. Это связано с тем, что на линиях ВН необходимо увеличивать расстояние между проводниками фаз и относительно земли.

Опоры ВЛ могут быть промежуточными, угловыми, анкерными и концевыми.

Промежуточные опоры удерживают провода на прямых участках линий. На промежуточных опорах провода крепят штыревыми изоляторами. Расстояние между опорами составляет 35-45 м для ВЛ с напряжением до 1 кВ, и 60 м – для линий до 10 кВ.

Угловые опоры ставятся в местах, где трасса меняет направление.

Анкерные опоры, также, как и промежуточные, устанавливаются на прямых участках трассы. Анкерные опоры выдерживают большую нагрузку, чем промежуточные, и для линий 10 кВ устанавливаются на расстоянии 250 м.

Концевые опоры – это разновидностью анкерных опор. Они устанавливаются в начале и в конце ВЛ. От других типов опор они отличаются тем, что должны выдерживать натяжение проводов, которое действует только с одной стороны.

Существуют и специальные опоры. Они отличаются от вышеуказанных высотой или конструкцией, так как предназначены для установки в тех местах, где трасса ВЛ пересекается с различными препятствиями или сооружениями.