

ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ. УСТРОЙСТВО ЛИНИЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПРОВОДАМИ С ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ.

Каролин БУДИ (Caroline Boudy)

Блез БОЖЕ (Blaise Beauger)

Преимущества воздушных защищенных линий (ВЛЗ) среднего напряжения обуславливают их все более широкое применение в мире и в Украине. В этом номере журнала мы начинаем цикл статей по книге Блеза Боже и Каролины Буди – инженеров компании SICAME, которые занимаются разработкой арматуры для таких линий. В книге обобщена информация о существующих в мире системах воздушных линий среднего напряжения, отмечены основные технические проблемы, возникающие при их внедрении, и предложены общие принципы их строительства с учетом практического опыта компании SICAME в разных странах мира. Надеемся, что эта информация будет полезна украинским специалистам.

Принцип построения линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием (ВЛЗ), преимущества и факторы риска

1. Общая информация

Сети среднего напряжения монтируются, как правило, между высоковольтными магистральными линиями электропередачи и низковольтной распределительной сетью. Такая схема позволяет поставлять электроэнергию населению и промышленным предприятиям. Основная функция данных сетей – снижение уровня напряжения в сети на пути к точке потребления электричества.

Уровни напряжения и сечения провода, используемые в таких сетях, могут различаться в зависимости от разнообразных параметров – географических, финансовых, электрических, механических и др. В общем случае в линиях электропередач с проводами с защитным покрытием могут использоваться напряжение от 6 до 50 кВ и сечение от 35 до 240 мм².

Изначально в линиях среднего напряжения использовались неизолированные провода. Монтаж таких линий требует меньших капиталовложений, однако данная технология сопряжена с рядом технических трудностей – линии требуют специализированного монтажа, обслуживания, и строгого соблюдения ряда процедур.

Линии среднего напряжения с неизолированным проводом должны соответствовать нормам безопасности при использовании вблизи объектов. У них также есть определённые слабые места, такие как частые аварии по причине высокой чувствительности к коротким замыканиям. К примеру, распространёнными причинами короткого замыкания, которое может прервать электроснабжение на несколько часов, являются падение веток и деревьев, случайное соприкосновение проводов двух фаз и т. д.

Директор ТОВ «СИКАМ Украина» **Владимир Дрёмов**

Из-за таких недостатков разрабатывались и испытывались другие типы линий среднего напряжения. В результате появились подземные линии электропередач среднего напряжения. Прокладка линий электропередач под землёй позволяет защитить их от нежелательного внешнего воздействия – таким образом, снижается вероятность сбоев, которые возникают в воздушных сетях с неизолированными проводами, когда их задевают ветви деревьев.

Тем не менее, руководители электросетей пришли к выводу, что данный тип монтажа требует больших финансовых затрат, чем в случае с воздушными линиями с неизолированными проводами.

Поэтому, монтаж линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием остаётся важным и перспективным направлением, не смотря на то, что требует достаточно больших капиталовложений – на 10–100% дороже линий с неизолированными проводами в зависимости от избранного типа монтажа (трёхпроводная структура, разделительная распорка и т.д.).

Линии среднего напряжения с проводами с защитным покрытием появились в 1970-х гг., и с их появлением начали развиваться конструкции жил проводов и оболочек, созданы различные типы таких линий.

Линии среднего напряжения с проводами с защитным покрытием появились в 1970-х гг., и с их появлением начали развиваться конструкции жил проводов и оболочек, созданы различные типы таких линий.

2. Провод с защитным покрытием в сетях среднего напряжения

Линии среднего напряжения с проводами с защитным покрытием могут иметь жилы различной структуры (количество проволок и форму) и выполняться из различных материалов. Так, жилы могут быть из алюминия, алюминиевого сплава или меди. Но они обяза-

тельно имеют защитную оболочку из полиэтилена.

Защитное покрытие выполняется из того же изоляционного материала, что и у изолированных линий на 0,4 кВ, но не имеет изолирующих диэлектрических свойств защитной оболочки. Линия напряжением свыше 1 кВ и толщиной оболочки, соответствующей данному типу линий, не достигает уровня диэлектрической прочности, обеспечиваемого изолированным низковольтным проводом. Таким образом, за пределами оболочки сохраняется остаточный потенциал. Поэтому, наряду с термином «защитное покрытие» широко употребляется термин «оболочка».

В данном разделе мы опишем различные сочетания жил и оболочек, возможных для проводов среднего напряжения с защитным покрытием.

2.1. Жила провода среднего напряжения с защитным покрытием

Жила провода с защитным покрытием может быть одного из двух типов:

- С проволоками круглого сечения: типы BLL, BLX, CC / CCT, СИП-3 и др. (Рис. 2.1).



Рис. 2-1: Жила с проволоками круглого сечения (Amo Kraft – Amokabel).

- Уплотнённые жилы: типы SAX, PAS / BLX и т. д. (Рис. 2.2).



Рис. 2-2: Уплотнённая жила (Amo Kraft – Amokabel)

Эти два типа жил обеспечивают несколько различных сочетаний по количеству проволок, типу материалов жилы и т. д.

Жила часто может выполняться из тех же материалов, что и в неизолированных проводах воздушных линий электропередач и по европейским стандартам могут быть следующих конструкций:

- Алюминиевый провод (ААС). Благодаря своему оптимальному соотношению масса/проводимость чаще всего используется

алюминий марки 1350-Н19. Данный тип провода имеет малую массу и используется на коротких пролётах. Механически он более хрупок и потому слабее проводов из алюминиевого сплава или со стальным сердечником.

- Провод из алюминиевого сплава (АААС). Наиболее применима марка сплава 6201-Т81. Данный материал обеспечивает достаточно высокую механическую прочность и такую же проводимость, как у проводов из алюминиевого сплава со стальным сердечником. Он используется вместо провода из алюминиевого сплава со стальным сердечником в прибрежных районах из-за большей устойчивости к коррозии. Данный тип провода проще в креплении, поскольку все проволоки выполнены из одного материала.

- Провод из алюминиевого сплава со стальным сердечником (АССР). Преимуществом данного типа провода является высокая механическая прочность, превосходящая как прочность алюминиевого провода, так и прочность провода из алюминиевого сплава. При равном сечении, механическая прочность провода из алюминиевого сплава со стальным сердечником вдвое больше, чем у провода без сердечника. Провода из алюминиевого сплава со стальным сердечником могут использоваться на более длинных пролётах, однако крепление их сложнее из-за наличия как стальных, так и алюминиевых проволок; данный тип жилы также использует отдельное крепление для каждого типа проволоки.

- Многожильный провод из алюминиевого сплава со стальным сердечником (ААССР) и провод из алюминиевого сплава с алюминиевым сердечником (ААСАР). В данных типах проводов сочетаются стальные проволоки и проволоки из алюминиевого сплава 1350 Н19, либо проволоки из чистого алюминия 1350 Н19 и алюминиевого сплава 6201-Т81. Это позволяет получить высокую механическую прочность и пропускную способность по току. Встречаются различные сочетания конструкций таких проводов, но на сегодняшний день они менее распространены.

- Медный провод. Используется достаточно редко. Имеет большую пропускную способность по току, чем алюминий. Эквивалентной пропускной способности по току можно добиться при помощи алюминиевого провода вдвое большего сечения, чем медного. Недостатками использования медных проводов являются их большая масса и высокая стоимость [2].

В линиях новой прокладки наиболее широко применяются алюминиевые проводники. Данный материал имеет меньшую массу и стоимость; он имеет меньшую удельную электропроводность, чем медь, но обеспечивает передачу электроэнергии той же мощности при использовании большего сечения. Его меньшая масса позволяет использовать конструкции сети, предназначенные для медных проводов. Однако старые объекты сети с медными проводами по-прежнему существуют.

Алюминий, как и медь, чувствителен к коррозии. Коррозия материалов ускоряется в присутствии воды или коррозионной атмосферы, способных повредить кабель. Защитная оболочка провода среднего напряжения с защитным покрытием предохраняет проводник от разрушительного воздействия коррозии из-за проникновения воды. Поэтому требуется, чтобы линия была полностью защищена и герметична, и никакие её части не создавали точек возможного попадания влаги. В противном случае оболочка удерживает испарение влаги и ускоряет коррозию, чего не происходит в линиях с неизолированными проводами. Поэтому во избежание коррозии важно сохранять водонепроницаемость линий электропередач среднего напряжения с защитным покрытием. Вспомогательное оборудование и арматура играет при этом важную роль в сохранении водонепроницаемости провода.

В городских и пригородных условиях, где важной может быть плотность сети распределения, могут использоваться алюминиевые провода, поскольку они легче и лучше подходят для коротких пролётов. Эти кабели отлично подходят для подвесных линий с разделительными распорками.

В сельской местности плотность сети распределения имеет меньшее значение, поэтому используются провода из алюминиевого сплава со стальным сердечником и провода из алюминиевого сплава с меньшим сечением. Данные типы проводов более прочны и способны выдерживать механическое напряжение на более длинных пролётах.

Первые линии с защитным покрытием создавались с жилами, окружёнными несколькими неуплотнёнными проволоками круглого профиля. Жила в таком проводе изготавливается способом экструдирования, собирается в жгуты, после чего покрывается защитной оболочкой. Такой провод более чувствителен к явлению электромагнитной напряжённости. На рисунке 2.3 показано, как



Рис. 2-3: Электромагнитная напряжённость между неуплотнёнными проволоками [3]

проволоки жилы формируют концентрацию напряжённости электрического поля.

На поверхности провода градиент напряжённости поля достигает максимума по отношению к ближайшей точке с нулевым потенциалом. При контакте или случайном касании с заземлённым предметом или другой фазой напряжённость поля создаёт между таким предметом и проводом электрический разряд, что может привести к пробое защитной оболочки и потере её изолирующих и водозащитных свойств.

Этот градиент может быть снижен добавлением полупроводникового слоя между проводниками и оболочкой, позволяющего уравнять градиент потенциала по краям провода.

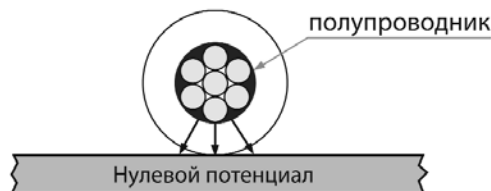


Рис. 2-4: Контроль напряжённости поля добавлением полупроводникового слоя

В жиле уплотнённого провода проволоки секторного профиля расположены близко одна к другой и образуют круглый проводник, почти однородный по всему поперечному сечению. Данный тип провода обеспечивает меньший диаметр, чем в проводах того же сечения с неуплотнёнными проволоками.

В данном случае напряжение провода лучше распределяется по краям проводника; кроме того, сокращается электромагнитное напряжение на внешней оболочке. Это также помогает обойтись в уплотнённых проводах без полупроводникового слоя [3].

2.2. Оболочка провода среднего напряжения с защитным покрытием

Оболочка провода среднего напряжения с защитным покрытием может выполняться из сшитого полиэтилена высокой плотности.

Она может иметь несколько слоёв, количество которых прямо пропорционально напряжению линии и степени защиты, требуемой от оболочки. В зависимости от толщины оболочки и её характера диэлектрическая плотность провода или его устойчивость к электрическому напряжению может изменяться.

Существует два типа проводов с защитным покрытием по количеству слоёв оболочки:

- однослойная;
- многослойная.

2.2.1. Однослойная оболочка

Однослойная оболочка провода среднего напряжения с защитным покрытием выполняется из сшитого полиэтилена (XLPE) или полиэтилена высокой плотности (HDPE). Существует несколько типов оболочки с различной толщиной в зависимости от напряжения линии и от типа жилы кабеля. Однослойная оболочка обычно используется с уплотнёнными жилами, позволяющими уменьшить электромагнитную напряжённость, в частности в проводах SAX, PAS / BLX, СИП-3. Здесь защитная оболочка выполняется из сшитого полиэтилена с добавлением технического углерода для повышения устойчивости к ультрафиолету.



Рис. 2-5: Провод с однослойным защитным покрытием (производства Southwire)

Некоторые типы неуплотнённых проводов также имеют однослойную оболочку, например – CC/CC. Толщина данной оболочки больше, чем тип провода SAX / BLX. Она выполняется из сшитого полиэтилена с добавлением технического углерода или оксида титана для повышения устойчивости к ультрафиолету и может быть чёрного или серого цвета в соответствии с требованиями стандартов ряда стран[4].

2.2.2. Многослойная оболочка

В таких проводах могут использоваться многослойные оболочки из 2 или 3 слоёв



Рис. 2-6: Провод с многослойной оболочкой (производства Hendrix cable)

материалов с различными механическими и электрическими свойствами.

Данные провода могут применяться при напряжении от 5 до 35 кВ или даже свыше 35 кВ. В зависимости от количества слоёв провод обладает различными свойствами.

• **2 слоя:** жила может выполняться из алюминия, алюминиевого сплава или алюминиевого сплава со стальным сердечником. Данный провод может использоваться в линиях напряжением до 15 кВ. Такой тип провода от производителей Hendrix, Southwire можно встретить, например, в США.



Рис. 2-7: Провод с двухслойной оболочкой

Первый внутренний слой оболочки здесь состоит из чистого полиэтилена низкой плотности. Наружный слой выполняется из полиэтилена высокой плотности или сшитого полиэтилена. Внешний слой из полиэтилена высокой плотности дешевле, чем изолирующий слой. Он обладает высокой диэлектрической прочностью, но не очень надёжен.

• **3 слоя:** жила из алюминия, алюминиевого сплава или алюминиевого сплава со стальным сердечником, используется в сетях напряжением 15 кВ, 25 кВ, 35 кВ или даже 46 кВ и более. Жила может быть как уплотнённой, так и не уплотнённой.

Первый слой, соприкасающийся с жилой провода – полиэтиленовый полупроводник; следующий – чистый полиэтилен низкой плотности. Наружный слой выполняется из сшитого полиэтилена низкой плотности или полиэтилена высокой плотности.

Полупроводниковый слой в проводах с трёхслойной оболочкой, как было отмечено выше, позволяет уменьшить напряжённость электромагнитного поля при неуплотнённой жиле. Увеличение количества слоёв до 3 улучшает диэлектрические свойства провода. Для образования электрической дуги между жилой кабеля и заземлённым объектом, кото-



Рис. 2-8: Провод с трёхслойной оболочкой (производства Hendrix cable, Southwire)

рый может соприкасаться с кабелем, потребуются больше времени.

Ещё одна характеристика защитной оболочки провода, которая является важной для предупреждения трекинг-эффекта, — наличие или отсутствие в ней технического углерода. Обычно технический углерод добавляют в полиэтилен высокой плотности для повышения его устойчивости к ультрафиолетовому излучению. Недостаток в этом случае заключается в более высокой электропроводности защитной оболочки — технический углерод способствует прохождению электрических зарядов, накапливающихся на поверхности провода. Уменьшить содержание технического углерода в наружной оболочке тяжело, поскольку от него зависит устойчивость провода к ультрафиолету. Стандартное содержание углерода обычно составляет 3%. Компании «Амокрафт АБ» (Amo Kraft AB) и «Райтлайт» (Ritelite) предлагают провод BLL-T с оболочкой из зелёного полиэтилена высокой плотности, устойчивый к ультрафиолету и с низким содержанием технического углерода (0,5%). Это не единственный материал с таким свойством, на рынке также присутствует оксид титана, однако стоимость его выше технического углерода. Также следует отметить, что использование дополнительного оборудования и специальной арматуры помогает уменьшить влияние трекинг-эффекта [4].

С точки зрения механической защиты внешний слой из сшитого полиэтилена очень жёсткий. Он позволяет достаточно надёжно защитить провод от трения, царапин и повреждений.

2.2.3. Защита от влаги в проводе

Наличие влаги в жиле провода среднего напряжения с защитным покрытием в обычных условиях недопустимо. Для этого необходимо принимать меры предосторожности для защиты оболочки при монтаже линии. В случае недостаточно осторожного обращения с защитной оболочкой и вспомогательным оборудованием в ходе монтажа, под оболочку может просочиться влага, которая причинит вред жиле провода. Оставаясь без испарения под оболочкой провода, она по проволокам жилы попадает в точки соединений, и может привести к перегреву или авариям в электросети. Поэтому важно сохранять изолирующие свойства оболочки провода. Соединительные, анкерные и поддерживающие зажимы, которые обеспечивают герметичность провода, и другие методы защиты имеют основное значе-

ние для поддержания линии в работоспособном состоянии.

Существует несколько способов предотвратить попадание влаги внутрь провода:

- мастика или порошок;
- шприцевание проволоки;
- консистентная смазка.

2.2.3.1. Мастика или порошок:

Вводится между жилами провода и заполняет пустое пространство между проволоками. Эта процедура становится необходимой при использовании неуплотнённых жил, поскольку данный тип жилы более подвержен циркуляции воды, чем уплотнённый.

2.2.3.2. Шприцевание проволоки:

Осуществляется с помощью ЭВА (этиленвинилацетата), который наносится на каждую проволоку в жиле провода, а впоследствии на весь проводник.

2.2.3.3. Консистентная смазка:

Данная технология более не используется, поскольку вызывает соскальзывание оболочки.

3. Типы сетей

Линии среднего напряжения с проводами с защитным покрытием появились в 1970-х гг. в странах Скандинавии. Позднее они получили всемирное распространение. С этой технологией экспериментировали многие страны. Существуют различные типы сетей и различные способы монтажа. Их выбор зависит от решений технических специалистов, определяющих структуру сети, и условий внешней среды, в которых выполняется монтаж системы. На первых линиях возникал ряд проблем, таких как прерывание электропитания из-за падения веток на провода и повреждения оболочки образовавшейся электрической дугой. Благодаря этим ранним опытам конструкция была усовершенствована при помощи более современных и качественных технологий.

В настоящее время существуют три типа линий:

- С проводами в защитной оболочке из сшитого полиэтилена / полиэтилена высокой плотности — трёхпроводная система;
- С проводами в защитной оболочке и несущим тросом — системы с разделительной распоркой;
- С самонесущими проводами в защитной оболочке — системы с многожильным кабелем, также называемым «универсальный кабель».

Линии с многожильным кабелем могут использоваться как на опорах воздушных линий электропередач, так и под землёй. В силу своей конструкции, в которой в одном

кабеле собраны три фазы, многожильный кабель оснащён металлическим экраном. Способы работы с данным типом кабеля отличаются от предыдущих и близки к работам на подземных кабельных линиях.

3.1. Изолированный кабель с оболочкой из сшитого полиэтилена / полиэтилена высокой плотности: трёхпроводные системы

Данная система наиболее широко распространена среди линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием. В Европе, Америке и других странах такое расположение проводов на траверсах называют ещё "древовидной структурой". Этот термин означает воздушную защищённую линию, в кото-

го выше затрат на линии среднего напряжения с неизолированными проводами. Требуемый объём капиталовложений на 10–20% выше, чем при использовании неизолированных проводов. Однако затраты на прокладку линий в лесах могут быть сокращены за счёт уменьшения площади вырубki просеки[5].

Для данной системы подходят все типы защитных покрытий и жил. Выбор зависит от длины пролётов, наличия или отсутствия лесов возле линии, а также от требуемой мощности, в зависимости от которой выбирается тип жилы и сечение провода. Данный тип линий легко можно адаптировать к опорам, используемым для линий среднего



Рис. 3-1: Линии с трёхпроводной системой размещения проводов

рой проводники всех 3 фаз располагаются в горизонтальной или вертикальной плоскости, либо по сторонам треугольника. Данный тип сетей требует креплений и фиксации провода на опоре. Далее в статье такая система в последующем будет называться "трёхпроводной системой".

Такой тип линий может использоваться для напряжений от 6 до 110 кВ и позволяет размещать фазы на близком расстоянии друг от друга. На линиях с неизолированными проводами требуется расстояние между фазами около 1 метра, в то время, как при использовании проводов с защитным покрытием фазы могут размещаться на расстоянии 40 см. Преимуществом данного типа линий является повышение безопасности для людей и меньшее влияние на окружающую среду, например, в лесистых районах, где высок риск пожара. Также снижается вероятность короткого замыкания в сети. Такие линии легко монтировать в различных сетях, включая высокое напряжение. Ими также можно заменить старые линии среднего напряжения с неизолированными проводами, не меняя опор.

Затраты на монтаж провода среднего напряжения с защитным покрытием немно-

же выше затрат на линии среднего напряжения с неизолированными проводами. Поэтому возможна замена старых линий среднего напряжения с неизолированными проводами на линии данного типа без замены опор.

3.2. Провод с защитным покрытием на несущем тросе: системы с разделительной распоркой

Данный тип сети характеризуется наличием несущего троса, находящегося в верхней части линии, и наличием трёх фазных про-



Рис. 3-3: Линия с разделительной распоркой [6]

водников, располагающихся под несущим тросом по вершинам ромба.

Несущий трос многопроволочный сталеалюминевый неизолированный, фазные проводники имеют защитные оболочки. Вес линии поддерживается несущим тросом. Его также называют «защитным тросом», поскольку он служит для молниезащиты линии. Он должен иметь очень высокую электропроводность и может быть заземлён. Трос может состоять из 7 проволок, 5 из которых — сталь с алюминиевым покрытием, обеспечивающая высокую проводимость, а оставшиеся 2 — чистый алюминий. Такая конфигурация обеспечивает более высокую механическую прочность, чем у алюминиевого провода, благодаря стальным проволокам, и более высокую проводимость, чем у проводов из алюминиевого сплава со стальным сердечником, благодаря алюминиевым проволокам. Каждая жила может быть заземлена на расстояние до 150 м.

Фазные провода заключены в защитную оболочку и допускают временное соприкосновение фаз между собой или с веткой, не вызывая перебоев в электроснабжении.



Рис. 3-4: Провод с многослойной оболочкой в системе с распоркой (производство Hendrix)

Защитное покрытие состоит из трёх слоёв:

- 1 — алюминиевый провод;
- A — внутренний полупроводник;
- B — изоляция из полиэтилена низкой плотности;
- C — полиэтилен высокой плотности.

Жила провода уплотнена и устойчива к напряжённости электромагнитного поля, которое также снижается полупроводниковым слоем. Наружное покрытие из полиэтилена высокой плотности обеспечивает высокую устойчивость к трению и царапинам.

Фазы удерживаются на расстоянии одна от другой при помощи разделительной распорки. Она является ключевой составляющей линий такого типа.

Распорка из полиэтилена высокой плотности крепится зажимом на неизолированном несущем тросе, который поддерживает крепления и фазные провода.

Преимуществом данного типа линий является повышение безопасности для людей



Рис. 3-5: Разделительная распорка [6]

и гарантия определённого уровня надёжности/безопасности в лесистых районах, где высок риск пожара. Такие линии монтируются у рек для защиты рыбаков от травмирования при работе под линиями электропередачи. Чаще всего их используют в городских районах благодаря малым габаритам.

Затраты на монтаж системы с распоркой выше, чем при трёхпроводной системе. В сравнении с линией с неизолированными проводами, линия с распоркой требует на 20—100% больших капиталовложений. Поэтому в наших условиях данный тип линий не очень привлекателен, а вспомогательные устройства, монтируемые с разделкой кабеля, достаточно сложны [6].

3.3. Система самонесущих изолированных проводов: системы с многожильным кабелем, также называемым «универсальный кабель»

Такой тип линии может монтироваться на верхнем торце опоры, под землёй и даже под водой. Преимущество заключается в том, что он является самонесущим и не требует установки траверсы. Для крепления на опоре может использоваться обычная подвеска.

Применяемый кабель содержит три фазы. Он выглядит как подземный трёхфазный кабель, поскольку каждая фаза изолирована тремя последовательными слоями:

- внутренний полупроводник;
- изоляция;
- внешний полупроводник.

Металлический экран обеспечивает максимальную диэлектрическую защиту от случайного касания. Он охватывает три фазных провода. Поэтому данный тип линии не очень чувствителен к явлениям «трекинга» и напряжённости электромагнитного поля. При равном сечении данный кабель обладает меньшим полным сопротивлением на километр, чем провод среднего напряжения с защитным покрытием.



Рис. 3-6: Линия с многожильным "универсальным" кабелем [7]

За счёт меньшего провисания кабель позволяет увеличить длину пролётов. Но из-за большей длины пролётов кабель более чувствителен к условиям внешней среды, таким как ветер, лёд или снег, и может потребовать больше обслуживания, чем линия среднего напряжения с проводами с защитным покрытием.

Линии не требуют специального защитного оборудования или траверс. Однако, монтаж сетей данного типа остаётся наиболее дорогостоящим из-за стоимости кабеля и особенностей его воздушной прокладки [8].

4. Воздушные защищённые линии. Преимущества и факторы риска

4.1. Общая информация

В предыдущих разделах рассматривались виды проводов, жил и оболочек, а также существующие типы линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием. Конструктивные параметры определяют пропускную способность провода, механическую прочность линии и устойчивость к ультрафиолетовому излучению. Они также играют роль в устойчивости сети к напряжённости электромагнитного поля.

Мы также рассмотрели существующие конфигурации сетей в зависимости от топологии, района размещения, условий окружающей среды и влияние этих факторов на выбор конфигурации ЛЭП.

4.2. Монтаж

Оболочка обеспечивает защиту провода среднего напряжения с защитным покрытием. Она выполняется из полиэтилена высокой плотности или сшитого полиэтилена, и не представляет собой достаточной изоляции при существующем в такой сети напряжении.

На внешней поверхности провода существует ненулевое остаточное напряжение. Это остаточное напряжение ниже, чем напряжение, замеряемое на системе с неизолированными проводами (при таком же напряжении между фазами).

Данный тип провода с защитным покрытием позволяет размещать фазы на меньшем расстоянии друг от друга. Требуемое расстояние между фазами сокращается благодаря защитной оболочке, при этом ширина линии сокращается до 40% по сравнению с воздушными линиями с неизолированными проводами.

Например, линия среднего напряжения (22 кВ) с неизолированными проводами требует размещения проводов на расстоянии около 1 м между фазами; ширина коридора — по 2 м с каждой стороны. Таким образом, общая ширина коридора, требуемого для ЛЭП, составляет 6 м. Линии среднего напряжения (22 кВ) с проводами с защитным покрытием сокращают общий размер системы до 2,5 м.

Таким образом, трёхпроводная линия среднего напряжения с проводами с защитным покрытием оказывает меньшее влияние на окружающую среду и не требует расширения просеки в лесистых районах в сравнении с воздушными линиями с неизолированными проводами, размеры у которых наибольшие.

Близость расположения фаз меняет конфигурацию сети. Она позволяет применение опор, траверс, дополнительного оборудования, проводников и т. д. меньшего размера и массы. Существует возможность монтажа двух сетей на одной и той же опоре.

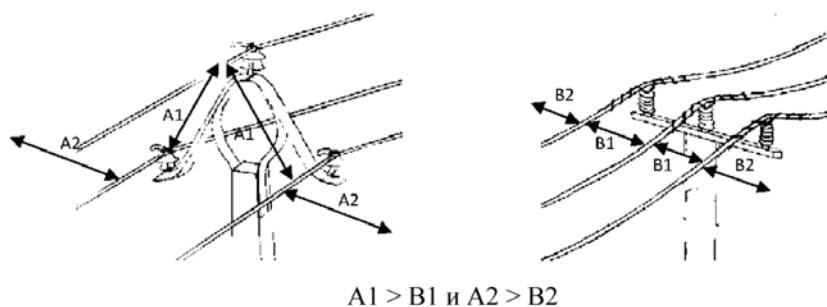


Рис. 4-1: Сравнительная схема линий с неизолированными проводами и с проводами с защитным покрытием [9]

Например, линия среднего напряжения с неизолированными проводами напряжением 22 кВ может располагаться совместно с линией среднего напряжения с проводами с защитным покрытием напряжением 110 кВ.

Линии среднего напряжения с проводами с защитным покрытием позволяют использовать деревянные опоры. Деревянная опора обеспечивает лучшую изоляцию между линией и землёй. Электромонтёрам проще подниматься на деревянные опоры при помощи специальной оснастки [1].

Экономия места является важной характеристикой линий с распоркой. При данной конфигурации линии среднего напряжения с проводами с защитным покрытием могут прокладываться до районов городской застройки без какой-либо опасности. Также возможен монтаж линий данного типа у рек, в холмистых или горных районах, в пожароопасных лесных районах. В районах, где случаются грозы, несущий трос линии с распоркой способен выдерживать удары молнии и защищать фазные провода. Данный тип линий обладает высокой надёжностью и механической прочностью, поскольку несущий трос выполнен из стальных проволок. Фазные провода подвергаются меньшему механическому напряжению. Линия защищена от воздействия льда и ветра при помощи распорки из полиэтилена высокой плотности, конструкция которой позволяет выдерживать механическую нагрузку, создаваемую этими явлениями.

Монтаж линий с распоркой — довольно дорогостоящее мероприятие. Требуемый для него бюджет выше, чем для монтажа любых других воздушных линий среднего напряжения. Затраты могут быть на 20—100% больше. Частота обслуживания таких линий менее важна, чем для линий с неизолированными проводами, благодаря ромбовидной схеме расположения. Несущий трос обеспечивает высокопрочную механическую защиту от падающих деревьев и веток, а также позволяет монтировать более длинные пролёты. Сокращается частота вмешательств, а затраты на обслуживание линии менее подвержены различным происшествиям.

Монтаж дополнительного оборудования в данной сети затруднён. Защитный слой из полиэтилена высокой плотности обладает высокой прочностью и обеспечивает хорошую защиту от царапин. При этом зачистка и оголение провода не целесообразна. Поэтому для электрического соединения проводов с защитным покрытием между собой и с дополнительным оборудованием линии необходи-

мо применение специальных герметичных прокалывающих зажимов. Монтаж таких линий требует строгого соблюдения технологических правил и аккуратной работы с инструментом [6]. Правила безопасности должны быть такими же, что и в основной сети.

4.3. Надёжность

Крупным преимуществом линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием является их защитная оболочка. Она особенно важна для предотвращения аварий вследствие таких происшествий, как падение на линию ветки или дерева, или случайное касание между фазами.

В линии среднего напряжения с неизолированным проводом случайное падение ветки или дерева между двумя фазами вызывает короткое замыкание. В результате такой аварии падает напряжение между соприкасающимися фазами. Во Франции автоматический выключатель со стороны источника обнаруживает аварию и выполняет две попытки отключения и повторного включения линии. Если при третьем повторном включении по-прежнему возникает сбой, подача электроэнергии прекращается, а для работ на линии высылаются ремонтная бригада. В сухих условиях, как в Австралии, падение на линию дерева или ветки может привести к лесному пожару. Австралия стала одной из первых стран, начавших установку линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием.



Рис. 4-2: Упавшее на ЛЭП дерево

В линии среднего напряжения с проводами с защитным покрытием защитная оболочка обеспечивает изоляцию, благодаря которой падение ветки или дерева между двумя фазами не вызывает немедленного короткого замыкания. Напряжение в проводе сохраняется и перебои в подаче электроэнергии не возникает. На линии необходимо проведение работ по устранению упавшего предмета для предотвращения разрыва кабеля или возникновения электростатического напряжения. При наличии оболочки сбой в подаче электроснабжения не возникает сразу, что даёт больше времени для принятия мер, прежде чем создание электрической дуги приведёт к повреждениям. Такое происшествие обнаружить сложнее из-за отсутствия очевидного влияния на подачу электроэнергии. Выявить его можно только в ходе осмотра линии или с разработкой технологии, позволяющей измерять частичные разряды [10].

4.4. Стоимость

Затраты на монтаж линии среднего напряжения зависят от её типа (с трёхпроводной системой проводов или с распоркой) и места прокладки (сельская или городская местность). В сравнении с системой с неизолированными проводами, монтаж линии среднего напряжения с трёхпроводной системой проводов с защитным покрытием на 10–20% дороже монтажа линии среднего напряжения с неизолированными проводами. Монтаж линии с распоркой может требовать на 20–100% больших затрат, чем линия среднего напряжения с неизолированным проводом [5].

Точнее, затраты на монтаж 3-фазной линии среднего напряжения с трёхпроводной системой проводов с защитным покрытием в городских районах может составлять от 30 000 до 75 000 евро/км. Такая разница в стоимости объясняется различиями во внешних условиях, в которых работают строители линии. Интенсивное движение транспорта вокруг места работ требует от них большей внимательности в работе и планирования её по времени таким образом, чтобы полностью не блокировать трафик. Ландшафт может требовать установки опор на бетонном фундаменте, что увеличивает время работы [11].

Каждая линия будет различаться по процессу монтажа и размеру бюджета. Определить бюджет до начала монтажа тяжело, однако возможно определить отдельные факторы, влияющие на каждую статью бюджета. Ниже мы постараемся перечислить эти факторы.

4.1. Приобретение провода

В предыдущем разделе рассказывалось о технологических новшествах последних лет в области конструкции жил и оболочек проводов среднего напряжения с защитным покрытием. Уплотнение жилы повышает устойчивость линии к проявлениям электростатического напряжения. Гидробарьер, или защита провода от влаги, предотвращает распространение воды внутри жилы при случайном попадании воды внутрь провода. Многослойные провода также повышают устойчивость к электростатическому напряжению.

Все эти технические улучшения имеют свою стоимость, но повышают надёжность линии. Они могут быть использованы, но не являются обязательными. Например, линия со специальной арматурой, обеспечивающей гидроизоляцию, снижает потребность в проводе с системой защиты от попадания воды – гидробарьером.

4.2. Приобретение дополнительной арматуры

Линии среднего напряжения с проводами с защитным покрытием требуют применения арматуры для крепления, подвески, крепление на штыревых изоляторах и электрического соединения проводов, как и линии среднего напряжения с неизолированным проводом. Они требуют решений по защите провода от напряжённости электромагнитного поля. Напряжение сети создаётся ненулевой потенциал на внешней поверхности оболочки. Потенциал будет большим или меньшим в зависимости от уровня загрязнённости в районе монтажа линии. Если разница напряжения достаточно высока, между заземлённой арматурой и проводом могут возникать искровые разряды, повреждающие наружную оболочку.

Арматура для линий с защитным покрытием является необходимой для поддержания линии в хорошем состоянии. Поэтому она требует дополнительных затрат в сравнении с линией среднего напряжения с неизолированным проводом. Дополнительная арматура позволяет повысить срок службы линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием, и предотвратить дополнительные расходы после монтажа, например, на замену повреждённого оборудования.

4.3. Инструменты и процедура монтажа:

Арматура и специальный инструмент производства группы «СИКАМ» (SICAME Group), предназначенные для монтажа

линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием – как обычных, так и с трёхпроводной системой проводов, также могут быть использованы для строительства линий среднего напряжения с неизолированными проводами. Как правило, для этого требуются шестигранные ключи стандартных размеров, ручной пресс и шестигранные обжимные матрицы. Нет необходимости применять какие-то специальные приёмы для монтажа линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием. Могут применяться существующие методы монтажа линий среднего напряжения с неизолированным проводом. Особое внимание следует уделять обращению с защитной оболочкой, чтобы предотвратить её повреждение.

И наконец, данный тип линий обеспечивает некоторое преимущество по времени монтажа из-за отсутствия необходимости обрезки ветвей в лесистых районах. Обрезка ветвей менее важна для линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием из-за сокращения коридора расчистки на 60% в сравнении с линиями с неизолированными проводами. Это свойство ещё сильнее проявляется в системах с распоркой. Трудозатрат на очистку маршрута от леса также потребуются меньше.

4.4. Работы по обслуживанию:

Для линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием необходима такая же организация обслуживания, что и для линии среднего напряжения с неизолированными проводами. Требования линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием по срочности проведения обслуживания меньше, чем у линий среднего напряжения с неизолированным проводом. Устранение упавших на линию веток или деревьев, контроль за окружающей растительностью также необходимы, чтобы обеспечить длительный срок службы и надёжность линии. Однако проведение таких мероприятий является менее срочным благодаря наличию защитной оболочки.

4.5. Безопасность

Использование линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием повышает безопасность для живых существ. Случайное касание линии человеком или животным не будет для них смертельным. Также, случайное соприкосновение ветки с проводом не приводит к утечке тока в землю или на соседнюю фазу благодаря наличию защитной оболочки.

4.6. Факторы риска, о которых необходимо знать

Для линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием существуют определённые факторы риска и необходимо знать о них, чтобы иметь возможность управлять рисками.

Мы приводим пять факторов риска:

- попадание воды;
- экстремальные погодные условия (снег, лёд, ветер);
- электрическое напряжение, приводящее к трекинг-эффекту;
- атмосферные электрические разряды (молнии);
- электрическое соединение путём прокола изоляции.

4.6.1. Попадание воды в провод

В начале статьи мы описали различные характеристики наружной оболочки линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием. Наружная оболочка предотвращает попадание воды в провод только в случае её сохранности и отсутствия повреждений. В отличие от линий с неизолированными проводами, с которых вода испаряется естественным образом, при попадании воды в жилу провода с защитным покрытием вода удерживается внутри провода. Нагревание кабеля под действием тока создаёт со временем коррозионную среду. Эта коррозионная среда постепенно повреждает и ослабляет жилу провода. Долговременное воздействие приводит к постепенному повреждению жилы.

Поэтому критически важно сохранение водонепроницаемости линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием. Для этого соединение, крепление, подвеска и другие работы с проводом должны проводиться без снятия защитной оболочки. В случае снятия защитной оболочки с участка провода важно восстановить затем изолирующие и герметизирующие свойства защитного покрытия. Восстановление выполняется с использованием полиолефина, устойчивого к ультрафиолету, который предотвращает попадание воды и устойчив к крайне высоким или низким температурам.

Что касается электрического соединения, целесообразна технология соединения с прокалыванием изоляции при сохранении водонепроницаемости провода. Такая технология обеспечивает электрическое соединение проводов без снятия наружной оболочки путём перфорации и восстанавливает герметичность непосредственно на проводе, не требуя дополнительных деталей.



Рис. 4-3: Обрыв провода из-за обледенения

4.6.2. Погодные явления

Линии среднего напряжения с проводами с защитным покрытием, при одинаковом сечении проводника и напряжении, имеют больший диаметр провода и вес, чем линии с неизолированным проводом. Причина заключается в защитной оболочке, которая увеличивает наружный диаметр и вес провода. Эти различия приводят к следующим явлениям:

- усилению колебаний провода из-за веса;
- уменьшению силы демпфирования колебаний провода при данной скорости ветра;
- увеличению аэродинамического воздействия на провод энергии ветра.

Данные явления обуславливают требование меньшей длины пролётов между опорами в линиях среднего напряжения с проводами с защитным покрытием [9]. Производителями арматуры разработаны изделия, позволяющие минимизировать воздействие внешней среды. К этой продукции относится, например, спиральные гасители вибраций. Они позволяют свести к минимуму воздействие вибрации и увеличить расстояние между опорами.

Линии с разделительной распоркой менее чувствительны к ветровым нагрузкам благодаря распорке и её защите от раскачивания проводов.

4.6.3. Электрическое напряжение, приводящее к трекинг-эффекту

Явление трекинг-эффекта возникает на элементах подвески или крепления линии. Близость провода к опоре создаёт разность потенциалов между элементами арматуры провода и заземлёнными конструкциями опоры. Это вызывает формирование электромагнитного поля с нормальным распределением напряжённости, которое ионизирует воздушное пространство между проводом и заземлением. Явление может быть ускорено

при высоком напряжении или расположении арматуры в районе высокого загрязнения. При достаточной ионизации воздушного промежутка и загрязнённых диэлектрических поверхностей арматуры и оболочки провода, на них возникают плавающие поверхностные потенциалы, приводящие к образованию электрических разрядов. Это приводит к повреждению наружной оболочки провода или арматуры, образованию на них проводящих угольных дорожек.

Данное явление несистематично и зависит от ряда факторов, таких как уровень напряжения, влажность, загрязнение в районе линии, климат и т. д. Таким образом, избавиться от него полностью невозможно. Однако его можно минимизировать и защитить арматуру от разрушительного воздействия.

Для этого в линии среднего напряжения с проводами с защитным покрытием плавающий потенциал может быть соединён с напряжением линии, что предотвращает появление разрядов и повреждение арматуры. Данное оборудование, такое как соединители и роговые разрядники с антитрекингowymi устройствами, антитрекингowe комплекты или устройства для защиты от формирования разности потенциалов, является частью защит-



Рис. 4-5: Трекинг покрытия провода

ного оборудования линий среднего напряжения с проводами с защитным покрытием. Подробно они будут рассмотрены в последующих разделах.

4.6.4. Атмосферные перенапряжения и грозозащита

Импульсное грозовое перекрытие (электрическая дуга) может возникнуть из-за удара молнии от наведенного электромагнитного поля. Данное явление имеет большое значение в районах с высокой грозовой активностью. На линиях среднего напряжения с неизолированными проводами электрическая дуга, не находя точки выхода на землю, может распространяться по линии на расстояние нескольких километров. Для линий с проводами с защитным покрытием, обладающим достаточным электрическим сопротивлением, электрическая дуга, как правило, неподвижна и образуется между кабелем под напряжением и заземлёнными траверсами изоляторов либо элементами заземления опоры. Длительное действие дуги может привести к пережогу жилы провода.

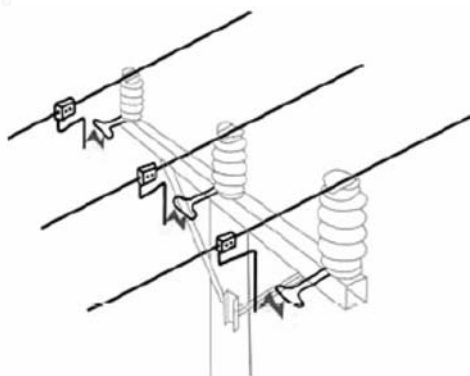


Рис. 4-6: Путь дуги через роговой разрядник

Защитные устройства, например, зажимы, оснащённые роговыми разрядниками и устройства защиты от дуги, как с ограничителями перенапряжения, так и без них, могут создать точку выхода и сформировать электрическую дугу в нужном месте. Данный тип защитных устройств защищает провод от повреждения дугой и может предотвратить перебои в энергоснабжении, если они оснащены также ограничителями перенапряжения.

6.5. Электрическое соединение методом прокола изоляции

Для электрического соединения проводов в линиях среднего напряжения с проводами с защитным покрытием широкое применение получила технология прокола изоляции. При монтаже соединительных зажимов, в данном случае, зубцы контактных пластин прокалывают

оболочку провода для установления электрического контакта с жилой.

Качество соединения будет зависеть от:

- конструкции и строгого подбора материалов, которые обеспечат нужные технические характеристики и надёжность соединения;
- способности коннектора сохранять водонепроницаемость кабеля для всех сечений благодаря наличию элементов герметизации;
- способности соединения функционировать независимо от обслуживающего персонала и внешних условий;
- однообразия типов соединителей для различных сечений и материала жилы провода (унификация).



Рис. 4-7: Метод прокола изоляции при электрическом соединении проводов с защитным покрытием

Все эти параметры влияют на устойчивость соединителя и качество электрического соединения при сохранении механических характеристик провода.

Электрическое соединение обеспечивается зубцами. Для оптимального качества соединения важна конструкция зубцов, являющихся важнейшей деталью, а материал должен обладать высокой твёрдостью и хорошей электропроводимостью. Мы рекомендуем медь или медный сплав, обеспечивающие необходимую твёрдость и низкое электрическое сопротивление. Конструкция остальной части соединения обеспечивает поддержку и проникновение ножевого контакта через оболочку провода таким образом, чтобы обеспечить хороший контакт с поверхностью, не повреждая при этом жилу провода.

При монтаже вращающий момент создаётся гаечным ключом или ударным гайковёртом. Технология срывной головки позволяет обеспечить вращающий момент, прилагаемый к деталям соединителя, в пределах требуемого значения. Болт соединителя превра-

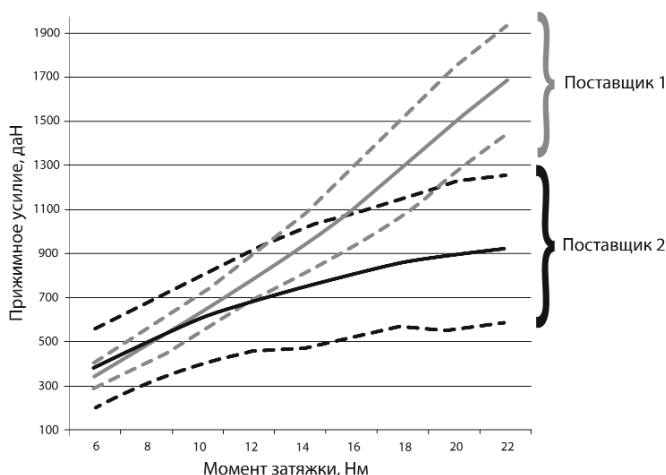


Рис. 4-8: Изменение прижимного усилия в зависимости от крутящего момента (диапазоны значений для двух испытанных партий болтов от различных поставщиков).

щает этот вращающий момент в линейное прижимное усилие. Важно обеспечить постоянный вращающий момент на срывной головке для обеспечения требуемого прижимного усилия контактных пластин.

Для обеспечения качества соединения важно обратить внимание на качество болта. Болт, используемый в соединителе с прокалыванием изоляции, также важен, как и выбор материалов всех деталей. При том, что от соединителя требуется хороший электрический контакт во время монтажа, также необходимо, чтобы в течение срока своей службы он поддерживал достаточное давление на провод для непрерывности электрического соединения. Это важно по причине ослабления (усадки материалов) с течением времени, происходящего после монтажа соединителя.

Правильно сконструированный соединитель конечно будет ослабевать, однако это ослабление стабилизируется и прекратится (зона А на рис. 4-9). В неправильно сконструированном соединителе ослабление продолжится, что может привести к ослаблению контакта, увеличению переходного сопротивления, перегреву и повреждению (зона В на рис. 4-9). Чем сильнее будет расслабляться соединитель, тем сильнее уменьшится прижимное усилие, увеличивая, таким образом, переходное сопротивление соединения по следующей формуле:

$$R_{(Om)} = f(1/F(H))$$

Контроль ослабления достигается за счёт:

- строгого подбора материалов;
- контроля производственного процесса;

- равномерного распределения механических нагрузок в соединителе;
- качества провода;
- температурной компенсации.

Строгий подбор материалов включает тщательный выбор смолы, составляющей пластик. Возможны различия между продукцией разных производителей, качество может зависеть от таких критериев, как длина волокна и выбор смолы. Важно, чтобы производителем оборудования обеспечивались высокие показатели по данным параметрам, а также по параметрам производства, таким как время обработки, температура

впрыскивания, сушка материала, температура штампа и давление фиксации.

Конструкция изделия влияет на распределение механических напряжений, а правильная конструкция корпуса позволяет сохранять качество затягивания без повреждений соединителя и провода.

Температура окружающей среды, при которой осуществляется монтаж, влияет на поведение соединителя из-за воздействия на материал. В проводе среднего напряжения с защитным покрытием изменение температуры окружающей среды влияет на показатели твёрдости оболочки и её механические свойства. Важно, чтобы соединитель был способен адаптироваться к таким изменениям. Чувствительность к температурным колеба-



Рис. 4-9: Явление ослабления в соединителе: (А – зона стабильного сопротивления; В – зона повышения сопротивления)



Рис. 4-10: Конструкция рельефа корпуса для распределения механических нагрузок

ниям у поликарбонатной или полиакриламидной срывной головки такая же, как и у оболочки провода. Благодаря этому сила затягивания в ней изменяется пропорционально температуре.

Таким образом, работа соединителя более соответствует условиям окружающей среды, если он оснащён пластиковой, а не металлической срывной головкой. Металлические срывные головки менее чувствительны к колебаниям температуры и создают постоянный крутящий момент, т. е. постоянное усилие независимо от температуры. Такое поведение металлических деталей, при недостаточно продуманной конструкции срывной головки, может привести к недостатку давления при большей твёрдости оболочки (при низких температурах) и излишнему давлению (повреждению проволок в жиле провода) при слишком высоких температурах.

Покупатель может проверить качество предлагаемой продукции по результатам испытаний согласно требуемым стандартам. Испытание на электрическое старение проверяет способность соединителя обеспечивать качественное электрическое соединение и сохранять достаточно низкий уровень переходного сопротивления длительное время. Испытание на монтаж при низкой температуре проверяет подбор крутящего усилия с целью создания оптимального достаточного давления для обеспечения электрического контакта без повреждения провода и корпуса соединителя. Климатическое старение позволяет оценить подбор и качество материалов после старения при критических атмосферных условиях.

Данные испытания и критерии приёмки соединительных зажимов определяются стандартами ЕС. Более подробно они описываются в следующей главе.

Продолжение читайте в следующем номере журнала «Электрические сети и системы»

Литература

2. *Оборудование* и система распределения электроэнергии [Electric power distribution and equipment and system] — 2006 г. — «Тейлор энд Френсис групп, Эл-эл-си» [Taylor and Francis Group, LLC].
3. *Системы* проводов с защитным покрытием для сетей распределения [Covered Conductor Systems for Distribution], EA Technology, Дж. Б. Вареинг [J.B. Wareing], 2005 г.
4. *Воздушные ЛЭП* с деревянными опорами [Wood pole overhead lines], Брайан Вареинг [Brian Wareing], Power and energy series 48.
5. *Инженерные* и строительные альтернативы рубке просек для ЛЭП [Engineering and construction alternatives to line clearance tree work], Джон Гудфеллоу [John W. Goodfellow], 01/1995).
6. *Руководство* Hendrix по проводам с защитным покрытием [Hendrix Covered Conductor Manual], «Вестерн пауэр» [Western Power], М. Остхюцен, Р. Латеган [M. Oosthuizen, R. Lategan], 2010 г.).
7. *Инструкция* по универсальному кабелю, Ericsson, 2009 г.
8. *Системы* проводов с защитным покрытием в сетях распределения [Covered conductor systems for distribution], Дж. Б. Вареинг, 12/2009/
9. *Опыт* применения воздушных ЛЭП с проводами с защитным покрытием [Finnish and Slovene experience of covered conductor overhead line], Тапио Лескинен, Виктор Ловренчич [Tapio Leskinen Victor Lovrencic].
10. *Непрерывный* мониторинг частичных разрядов в линиях 110 кВ и 20 кВ с проводами с защитным покрытием [On-line partial discharge monitoring of 110kV and 20kV covered conductor lines], 2004 г.
11. *Электроэнергия* и оборудование для её распределения [Electric power and distribution equipment].