

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра энергетики и технологии металлов

## **КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ**

Методические указания к практическим занятиям  
по курсу «Электрические станции и подстанции систем электроснабжения»  
для студентов специальности 140211 «Электроснабжение»

Курган 2012

Кафедра: «Энергетики и технология металлов»

Дисциплина: «Электрические станции и подстанции систем электроснабжения» (специальность 140211)

Составили: доцент, канд. техн. наук Мошкин В. И., доцент Афтаев В.И.

Утверждены на заседании кафедры 30 июня 2012 г.

Рекомендованы методическим советом университета

«\_\_»\_\_\_\_\_2012 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Передача электрической энергии от источников питания к потребителям осуществляется воздушными и кабельными линиями электропередач.

По сравнению с воздушными, кабельные линии намного дороже и имеют меньшую пропускную способность на единицу сечения (из-за температурных ограничений изоляции). Кабельные линии более трудоемки при сооружении и ремонте, требуют больших затрат материалов и более высокой квалификации обслуживающего персонала. Определение места повреждения может потребовать значительного времени. При сооружении кабельных сетей, как правило, предусматривают резервные линии.

Преимуществами применения подземных кабельных линий являются возможность пересечения уличных магистралей и инженерных коммуникаций значительным числом электрических кабелей любого напряжения, а также возможность прокладки этих линий вдоль магистралей. Для сооружения таких кабельных линий нужна небольшая территория. При этом удовлетворяются необходимые архитектурные и экологические требования. Кроме указанных преимуществ важно и то, что кабель, проложенный в земле, не подвержен атмосферным воздействиям: повреждения в кабельных линиях не опасны для населения, трассы линий недоступны для посторонних лиц.

Кабельные линии прокладывают там, где строительство воздушной линии невозможно из-за стеснения территории или нецелесообразно с архитектурной точки зрения, по условиям техники безопасности к другим требованиям. Кабельные линии сооружают на территории городов, промышленных предприятий, через большие водные пространства и т.п.

Кабели широко применяются в электроустановках. Потребители 6 – 10 кВ, как правило, получают питание по кабелям, которые сначала прокладываются в кабельных туннелях в распределительном устройстве, а затем в земле (в траншеях). Кабели 0,4 – 10 кВ используются для присоединения потребителей собственных нужд электрических станций и подстанций к соответствующим шинам.

Области применения силовых кабелей регламентируют «Единые технические указания по выбору и применению электрических кабелей».

В указаниях рассматриваются основные конструктивные элементы силовых кабелей, маркировка, способы прокладки, устройства кабельных линий и проектирование. Методические указания предназначены для самостоятельного изучения.

Поскольку выпускники специальности «Электроснабжение промышленных предприятий» имеют дело в основном с силовыми кабелями напряжением 0,4 – 10 кВ, эти вопросы освещены для кабелей указанного диапазона напряжений.

# 1.СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ

## Классификация силовых кабелей

Кабелем называется многопроволочный провод или несколько скрученных вместе взаимно изолированных проводов (жил), помещенных в общую герметическую оболочку. Поверх оболочки могут быть наложены защитные покровы [9].

Силовые кабели предназначены для передачи и распределения электрической энергии при напряжении промышленной частоты и при постоянном напряжении.

Классифицировать силовые кабели можно по напряжению, виду изоляции, конструктивным особенностям (рис.1) [16].

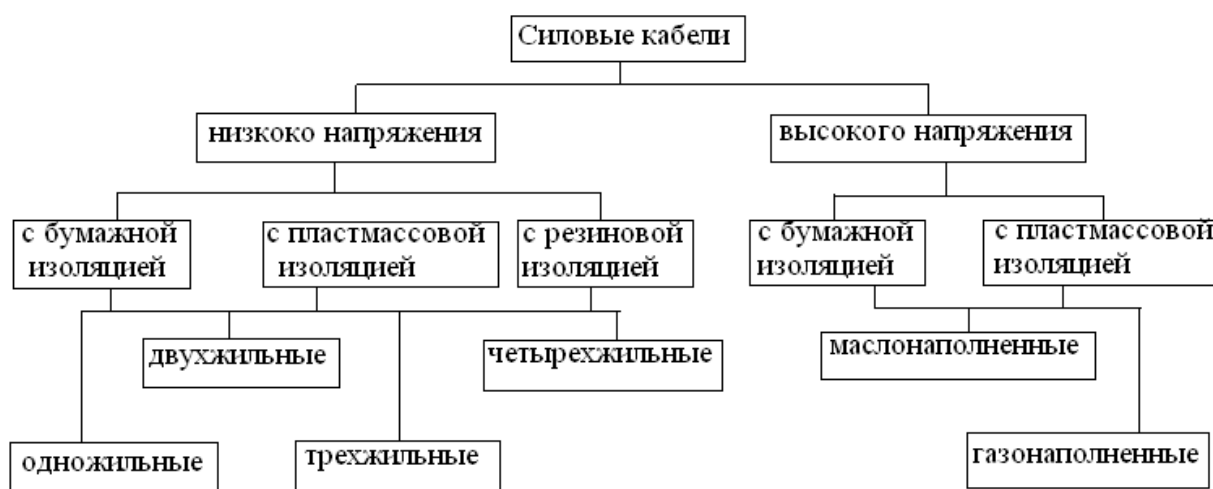


Рис.1 – Классификация силовых кабелей

Все силовые кабели по номинальному напряжению можно условно разбить на две группы. Первая (низкого напряжения) включает кабели, предназначенные для работы в электрических сетях переменного напряжения с изолированной нейтралью: 1, 3, 6, 10, 20 и 35 кВ частотой 50 Гц. Эти же кабели можно использовать в сетях с заземленной нейтралью и в сетях постоянного напряжения. Такие кабели выпускаются в СССР с бумажной пропитанной, пластмассовой и резиновой изоляцией.

Эти кабели более просты в изготовлении, удобны при монтаже и в эксплуатации. Из них кабели с бумажной пропитанной изоляцией пока наиболее распространены. Производство кабелей с пластмассовой изоляцией сейчас существенно расширяется и эти кабели наиболее перспективны. Силовые кабели с резиновой изоляцией выпускаются в ограниченном количестве.

Кабели низкого напряжения выпускаются в зависимости от назначения в одно-, двух-, трех- и четырехжильном исполнении. Одножильные и трехжильные кабели предназначены для работы в сетях напряжением 1 -35 кВ, двух – и четырехжильные кабели используются в сетях напряжением до 1 кВ.

Четырехжильный кабель предназначен для четырехпроводных сетей переменного напряжения. Четвертая жила в нем является заземляющей, поэтому

ее сечение, как правило, меньше сечения основных жил. Однако при прокладке кабелей во взрывоопасных помещениях и в некоторых других случаях сечение четвертой жилы выбирается равным сечению основных жил [14].

Кабели высокого напряжения 110кВ и выше (рис.1) (вторая группа) в методических указаниях не рассматриваются.

### **Основные конструктивные элементы электрического кабеля**

**Токопроводящие жилы.** Их может быть несколько или одна, разных по величине и форме. Предназначены жилы для направления потока электрической энергии в кабеле. Площадь сечения жил определяет величину потерь мощности на нагревание от протекающего по ним тока. Для большей гибкости при необходимости жилы изготавливаются не из одного проводника, а из нескольких, скрученных вместе.

**Изоляция.** (слой изолирующего материала). Отделяет токопроводящие жилы друг от друга и от наружной металлической оболочки (если она имеется). Изоляция служит для противодействия силам электрического поля между жилами и оболочкой кабеля, стремящимися создать ток утечки или пробой в кабелях. Кабельная изоляция должна допускать изгиб кабеля в процессе производства и при прокладке.

**Защитные оболочки и покровы.** Предохраняют изолирующий слой кабеля от воздействия окружающей среды и механических повреждений. К ним же относятся и антикоррозийные покрытия. Разные оболочки (свинцовая, резиновая и т.п.) различаются по своей механической прочности, коррозионной устойчивости и главным образом по влагонепроницаемости, т.к. большинство кабельных изолирующих материалов сильно ухудшают свои изолирующие свойства при увлажнении.

Подробнее остановимся на характеристиках этих конструктивных элементов кабеля.

### **Токоведущие жилы**

Материалом токоведущих жил является медь или алюминий. Применение меди должно быть обосновано ввиду ее дефицитности [14].

В зависимости от сечения жилы могут быть одно – или многопроволочными (табл. 1).

По числу жил различают кабели одно-, двух-, трех- и четырехжильными. По форме токоведущие жилы могут быть круглыми и фасонными. Последние – секторные и сегментные позволяют уменьшить размеры кабеля (поперечное сечение). Кроме того, жила может быть как уплотненной, так и неуплотненной (рис.2).

Таблица 1

Материал токоведущей жилы	однопроволочные	многопроволочные
медь	до 16 мм <sup>2</sup>	25 мм <sup>2</sup> и более
алюминий	до 120 мм <sup>2</sup>	150 мм <sup>2</sup> и более

Номинальные сечения жил кабелей регламентированы стандартом: 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 400; 500; 625; 800 мм<sup>2</sup>.

## Изоляция

Силовые кабели могут быть проложены в земле, под водой, на открытом воздухе и внутри помещения. Такие кабели на напряжение до 35кВ включительно в СССР изготавливают в основном с изоляцией из плотной бумаги, пропитанной специальной кабельной массой (компаундом).

В зависимости от вязкости пропиточного состава кабели с бумажной изоляцией изготавливают с вязким, обедненным и с нестекающим пропиточным составом.

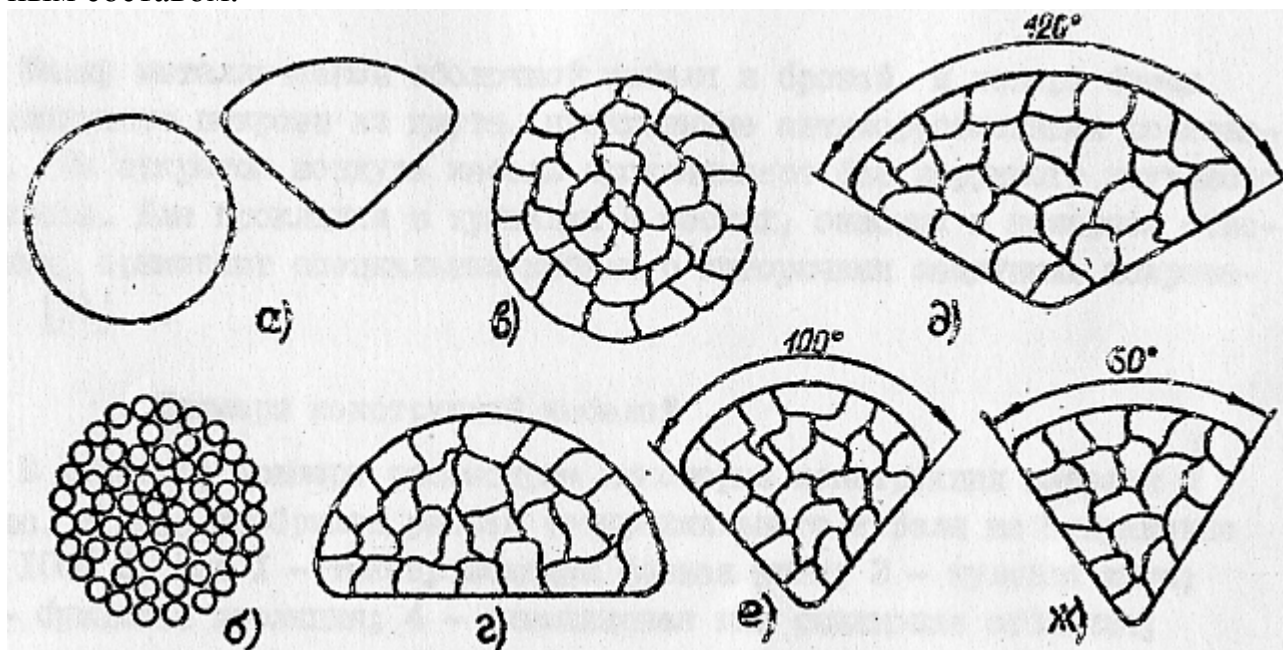


Рис. 2 – Сечения токопроводящих жил кабеля:

*а - круглая и секторная сплошная жила: б - круглая скрученная неуплотненная жила: в - круглая скрученная уплотненная жила: г - сегментная скрученная уплотненная жила: д - секторная скрученная уплотненная жила для трехжильных кабелей: е, ж - секторная скрученная уплотненная жила для четырехжильных кабелей.*

Кабель с вязким пропиточным составом – это кабель с бумажной изоляцией, пропитанной маслоканифольным или подобным ему по вязкости изоляционным составом.

Кабель с обедненно-пропитанной изоляцией – это кабель с вязким пропиточным составом, свободная часть которого частично или полностью удалена, то есть бумажная изоляция освобождена от избытка пропиточного состава. Такие кабели предназначены для вертикальных и наклонных трасс с ограниченной разностью уровней.

Кабель с нестекающим пропиточным составом – это кабель с бумажной изоляцией, пропитанной изоляционным составом, вязкость которого такова,

что при рабочих температурах кабеля состав не способен к стеканию. Данные кабели применяют на вертикальных и наклонных участках трассы без ограничений разности уровней.

Пропитанная бумажная изоляция жил кабелей имеет хорошие электрические характеристики, продолжительный срок службы, сравнительно высокую допустимую температуру, относительно невысокую стоимость.

Резиновая изоляция изготавливается из синтетического или натурального каучука и отличается гибкостью и негигроскопичностью. Ее недостатки – быстрое старение, относительно высокая стоимость и сравнительно низкая допустимая температура нагрева, что влечет снижение допустимой токовой нагрузки кабеля.

Пластмассовая изоляция выполняется в основном из поливинилхлорида и полиэтилена.

Кабели с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката применяются преимущественно на напряжение до 1000 В, недостатком этого пластиката является его термопластичность. Нагрев жилы токами нагрузки может вызвать размягчение изоляции и смещение жилы из центрального положения к периферии изоляционного слоя. Кроме того, электрическая прочность изоляции из поливинилхлоридного пластиката зависит от времени нахождения под напряжением переменного тока.

Полиэтилен – один из синтетических полимеров, имеющий наибольшее применение и перспективное широкое использование в качестве изоляции кабелей особенно для круто наклонных и вертикальных участков трассы. Полиэтилен обладает хорошими механическими свойствами в широком интервале температур, стойкостью к действию кислот, щелочей, влаги и имеет высокие электроизоляционные характеристики [17].

Кабели с полиэтиленовой изоляцией выпускаются отечественной промышленностью серийно на напряжения до 35кВ включительно.

Изоляция многожильного кабеля, наложенная поверх изолированных скрученных или параллельно уложенных жил, называется поясной изоляцией (изоляция каждой жилы называется фазной изоляцией).

Для придания кабелям нужной формы между отдельными жилами вставляют специальные жгутики – заполнители из джута. Пространство между жилами в зависимости от вида изоляции заполняют жгутами из бумаги, резины либо пряжи, пропитанной антисептиком, поливинилхлоридом или полиэтиленом.

## **Защитные оболочки и покровы**

Поверх изоляции кабель опрессовывают бесшовной оболочкой из алюминия или свинца, чтобы в изоляцию не попадала влага. Механическая прочность алюминиевой оболочки в 2 – 2,5 раза выше, чем свинцовой оболочки, масса в 4,2 раза меньше. Алюминиевая оболочка устойчива против вибраций и имеет сравнительно небольшую текучесть.

Оболочка кабеля может выполняться и из пластмассы (в основном для кабелей до 1 кВ).

Для защиты от механических повреждений кабель покрывают броней из стальной ленты. Для кабелей, подвергающихся особо значительным растягивающим усилиям, может быть изготовлена комбинированная броня.

Между металлической оболочкой кабеля и броней и поверх брони накладывают покровы из джута, пропитанные антикоррозионными составами. На открытом воздухе кабель прокладывают без наружного джутового покрова. Для прокладки в туннелях и местах, опасных в пожарном отношении, применяют специальные кабели с негорючими защитными покровами [14].

### Примеры конструкций кабелей

В качестве примера рассмотрим некоторые конструкции кабелей (рис.3.), где изображен разрез четырехжильного кабеля на напряжение до 1000 В, где 1-токопроводящая фазная жила; 2-нулевая жила; 3-бумажная изоляция; 4-алюминевая или свинцовая оболочка; 5-стальная ленточная броня; 6-защитный покров от химического воздействия; 7-бумажный накопитель.

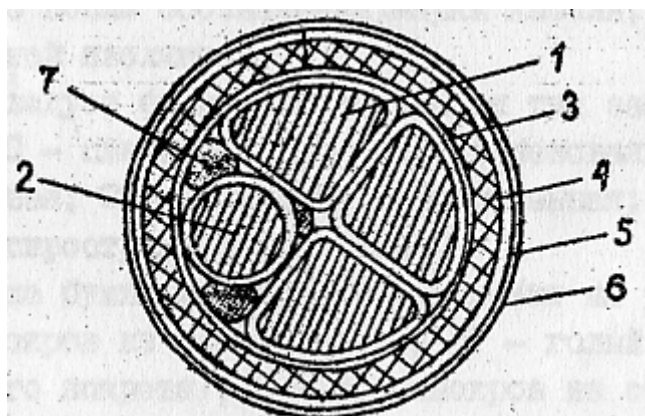


Рис. 3 – Четырехжильный кабель на напряжение до 1000 В.

Трехжильный кабель (рис.4) рассчитан на напряжение 6-10 кВ, с бумажной изоляцией.

Кабели на напряжение 20 и 35 кВ выполняют с отдельно освинцованными круглыми (а) или экранированными (б) жилами (рис. 5).

В первом типе кабеля бесшовная свинцовая оболочка наложена поверх бумажной фазной изоляции каждой жилы. Все составляющие конструкции такого кабеля, находящиеся вне свинцовых оболочек фаз, нужны лишь для защиты кабеля от механических повреждений и химического воздействия.

В кабелях с отдельно экранированными жилами поверх бумажной изоляции каждой жилы наложен слой тонкой перфорированной медной ленты. Общая свинцовая оболочка защищает изоляцию всех трех жил. Наличие отдельно свинцованных оболочек или экранировка каждой жилы обеспечивает более равномерную структуру электрического поля и, следовательно, лучшее использование изоляции кабеля. Экраны предназначены для защиты внешних цепей от



влияния электромагнитных полей токов, проходящих по кабелю, и для обеспечения симметрии электрического поля вокруг жил кабеля.

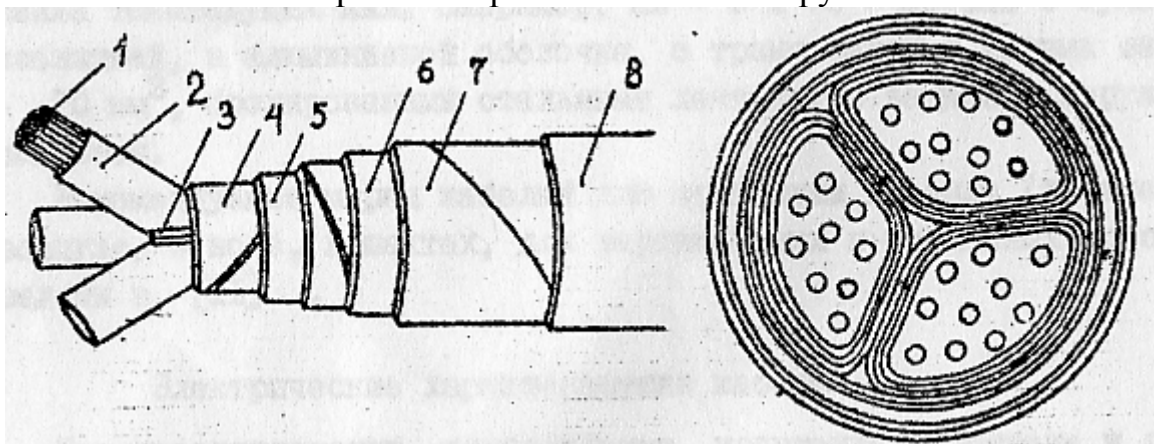


Рис 4. – Трехжильный кабель: 1-токопроводящая жила; 2 - фазная изоляция; 3 - междуфазная изоляция; 4 - поясная (общая) изоляция; 5- свинцовая или алюминиевая оболочка; 6 - защитный покров под броней; 7- броня из стальных лент; 8 - наружный защитный покров

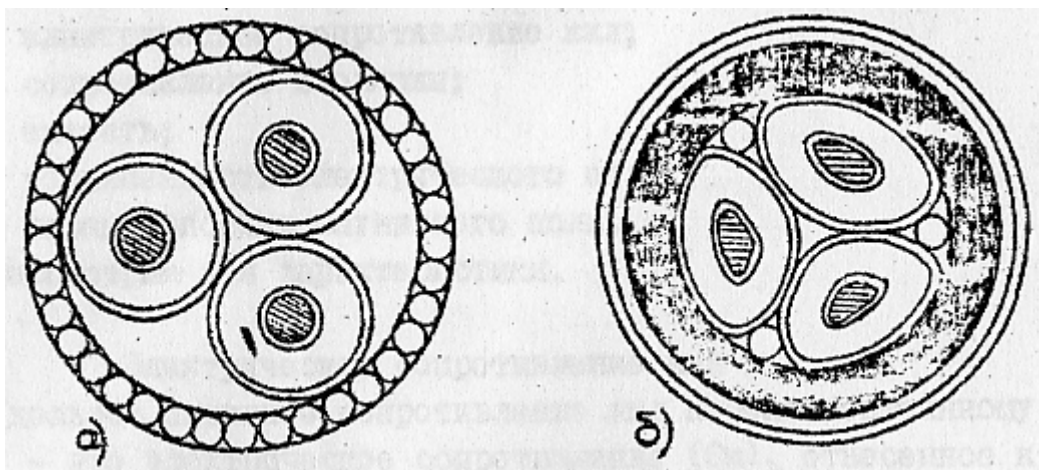


Рис 5. – Кабели на напряжении 20 (а) и 35 (б) кВ

Кабель на напряжение выше 20 кВ всегда изготавливают по типу одножильного кабеля, то есть с радиальным электрическим полем, так как в этом случае надежность работы кабеля при высоком напряжении имеет особо важное значение.

Как уже отмечалось выше, конструкции кабелей напряжением более 35 кВ в данных методических указаниях не рассматриваются.

### Маркировка силовых кабелей

Маркировка силовых кабелей обычно включает буквы, указывающие на материал, из которого изготовлена жила, изоляция, оболочка и тип защитного покрова. Маркировка кабелей высокого напряжения отражает также особенности его конструкции.

Марки кабелей обозначают буквами алфавита. Первая буква маркировки характеризует материал токоведущих жил, причем медь не маркируется, алюминий – буквой А.

Следующая буква марки кабеля указывает на материал изоляции: бумажная пропитанная изоляция не имеет буквенного обозначения; бумажная изоляция с нестекающим составом на основе церезина или другого состава – Ц; полиэтиленовая изоляция – П; поливинилхлоридная - В; резиновая – Р; изоляция из вулканизированного полиэтилена – в; изоляция из самозатухающего полиэтилена – с. Если буква В расположена через дефис после обозначения марки кабеля, то это кабель с обедненнопропитанной изоляцией.

Затем следует буква, обозначающая тип защитной оболочки: А – алюминиевая; С – свинцовая; П – полиэтиленовая; В – из поливинилхлорида; Р – резиновая; СТ – стальная гофрированная; Н – резиновая маслостойкая, не распространяющая горение.

Последние буквы маркировки указывают на тип защитного покрова: Б – бронепокров из плоских лент; БГ – голый (при отсутствии наружного джутового покрова); К – бронепокров из стальных круглых проволок; П – бронепокров из стальных плоских проволок.

Строчная буква «в» после обозначения брони обозначает усиленное покрытие алюминиевой оболочки. Например, ААПв, ААБв. Особо усиленное покрытие обозначается строчной буквой «у».

Наружный защитный покров из поливинилхлоридного шланга обозначается Шв, а из полиэтиленового шланга – Шп. Усиленная подушка у защитного покрова – л, а особо усиленная – лл. Негорючий наружный покров обозначается буквой «н», а отсутствие подушки у защитного покрова – «б».

Для кабелей с отдельно освинцованными жилами маркировка дополняется буквой «о». Для кабелей, предназначенных для вертикальных прокладок, в обозначении указывается буква В.

Газонаполненные кабели в обозначении имеют букву Г, маслонаполненные кабели – букву М, а также букву, указывающую на характеристику давления масла в кабеле и связанные с этим особенности конструкции.

Примеры обозначений:

МНС – кабель маслонаполненный, низкого давления, в свинцовой оболочке с упрочняющим и защитным покровом. СГ – кабель с бумажной пропитанной изоляцией, материал токоведущих жил – медь; имеет свинцовую оболочку, защитные покровы отсутствуют. АПАШв – алюминиевая жила, изоляция из полиэтилена, алюминиевая оболочка и шланг из поливинилхлоридного пластика.

После буквенного обозначения марки кабеля указывается число, и сечение токоведущих жил. Например, АБ –  $3 \times 70$  – кабель с бумажной изоляцией, в алюминиевой оболочке, с тремя медными жилами сечением  $70 \text{ мм}^2$ , бронированный стальными лентами, с защитным наружным покровом.

Рекомендуемые марки кабелей для прокладки в земле (траншеях), в воздухе, в воде, в шахтах, для вертикальных и наклонных трасс, приведены в [11].

## Электрические характеристики кабелей

При проектировании, изготовлении, испытаниях, монтаже и эксплуатации силовых кабелей следует учитывать характеристики последних.

К этим характеристикам относятся [8]:

- электрическое сопротивление жил;
- сопротивление изоляции;
- емкость;
- напряженность электрического поля;
- характеристики магнитного поля.

Рассмотрим эти характеристики.

### Электрическое сопротивление жил

Удельное активное сопротивление жил кабеля постоянному току ( $\rho$  - это электрическое сопротивление (Ом), отнесенное к единице сечения ( $1 \text{ мм}^2$ ) к единице длины (1 км) при температуре  $20^\circ\text{C}$ ) не должно превышать [14] для меди  $\rho_m = 17,9 \text{ Ом}$ ; для алюминия –  $\rho_a = 29,4 \text{ Ом}$ .

С изменением температуры, а также в результате скрутки отдельных проволок многопроволочной жилы действительное сопротивление жилы может не соответствовать ее номинальному значению.

С учетом влияния температуры электрическое сопротивление можно определить по формуле [18]:

$$R_t = R[1 + \alpha_t(t - 20)],$$

где  $\alpha_t$  – температурный коэффициент удельного сопротивления,  $\text{K}^{-1}$  (для меди  $\alpha_{tM} = 0,0043 \text{ K}^{-1}$ , для алюминия  $\alpha_{tA} = 0,004 \text{ K}^{-1}$ ).

### Сопротивление изоляции

Сопротивление изоляции кабеля  $R_{из}$  представляет собой частное от деления приложенного постоянного напряжения  $u$  на ток, проходящий через минуту после включения напряжения:

$$R_{из} = \frac{u}{I_{мин}}.$$

Измерением сопротивления изоляции устанавливаются правильность процесса сушки и пропитки бумажной изоляции, а также степень ее влажности.

Измерение сопротивления изоляции производится мегомметром на напряжение 2,5 кВ. Для силовых кабелей до 1 кВ сопротивление изоляции должно быть не менее 0,5 Мом. Для силовых кабелей выше 1кВ сопротивление изоляции не нормируется. Измерение следует производить до, и после испытания кабеля повышенным напряжением [14].

Силовые кабели выше 1 кВ испытывают повышенным напряжением выпрямленного тока. Значение испытательного напряжения и длительность приложения его приведены в [14].

Кабель считается выдержавшим испытания, если не произошло пробоя, не было скользящих разрядов и толчков тока, утечки или его нарастания после того, как он достиг установившегося значения.

Полиэтиленовая изоляция кабелей обладает значительно большим сопротивлением по сравнению с кабельной изоляцией из поливинилхлорида.

Сопротивление изоляции жил кабелей при рабочих температурах (на 1 км длины) для кабелей с поливинилхлоридной изоляцией должно быть не менее 0,005 МОм (1 кВ), 0,05МОм (6кВ), 0,5МОм (10кВ).

Для кабелей 1 – 35 кВ с полиэтиленовой изоляцией при этих же условиях сопротивление изоляции должно быть не менее 50 МОм.

### Емкость кабельной линии

Значение емкости для кабелей действующими стандартами не регламентируется. Однако в протяженных кабельных сетях 6 – 35 кВ большое значение имеют токи замыкания на землю, так как сети этих напряжений в СССР работают обычно в режиме изолированной нейтрали [14]. Величина емкостного тока нужна для правильной настройки дугогасящих устройств сети.

Значение емкостного тока может быть найдено по эмпирической формуле

$$I_c = 0,1U \cdot l, \quad (3)$$

в которую значения напряжения и длины подставляют соответственно в киловольтах и километрах; результат получается в амперах.

Более точное определение емкостного тока можно определить с использованием погонных (на 1 км) емкостных токов при однофазном замыкании на землю в системе с незаземленной нейтралью (табл. 2)[8].

Таблица 2

Номинальное сечение кабеля, мм <sup>2</sup>	Емкостные токи при номинальном напряжении кабеля (кВ), А/км			
	6	10	20	35
10	0,30	-	-	-
16	0,35	0,51	-	-
25	0,45	0,59	1,9	-
35	0,52	0,70	2,2	-
50	0,60	0,75	2,5	-
70	0,73	0,86	2,8	3,8
95	0,85	1,02	3,1	4,2
120	0,90	1,10	3,5	4,5
150	1,10	1,30	3,7	4,8
185	1,20	1,40	4,0	5,1
240	1,30	1,60	-	-

**Пример:** Найти общую величину емкостного тока замыкания на землю для настройки дугогасящих устройств в РУ 10 кВ.

К РУ подходят питающие и распределительные линии (электрически связанные) следующих сечений и суммарной длиной

- питающие линии: 185 мм<sup>2</sup> – 8 км; 150 мм<sup>2</sup> – 12 км;

- распределительные линии:  $70 \text{ мм}^2 - 10 \text{ км}$ ;  $50 \text{ мм}^2 - 12 \text{ км}$ ;  
 $35 \text{ мм}^2 - 8 \text{ км}$ ;  $16 \text{ мм}^2 - 5 \text{ км}$ .

Приближенно по формуле (3) емкостный ток

$$I_c = 0,1 \cdot 10 \cdot (8 + 12 + 10 + 12 + 8 + 5) = 55 \text{ А.}$$

Уточненное значение емкостного тока в соответствии с данными (табл. 2) составляет

$$I_c = (1,4 \cdot 8 + 1,3 \cdot 12) + (0,86 \cdot 10 + 0,75 \cdot 12 + 0,7 \cdot 8 + 0,51 \cdot 5) = 52,6 \text{ А.}$$

## Напряженность электрического поля

Надежность работы изоляции кабеля при эксплуатации определяется ее электрической прочностью и соответствием принятого значения напряженности электрического поля максимально допустимой ее величине. В трехжильных кабелях с поясной изоляцией максимальная напряженность электрического поля принимается не более  $4 \text{ кВ/мм}$ , а в кабелях с отдельными металлическими оболочками на жилах –  $5 \text{ кВ/мм}$ .

Меньшая величина напряженности электрического поля, установленная для кабелей с поясной изоляцией, объясняется сложностью и неблагоприятным распределением электрического поля в изоляции кабелей этой конструкции. Как видно (рис. 6а), в кабеле с отдельными металлическими оболочками на жилах действие электрического поля ограничивается металлической оболочкой. Вне металлической оболочки каждой жилы электрического поля нет – заземленная металлическая оболочка служит экраном, ограничивающим распространение силовых линий электрического поля.

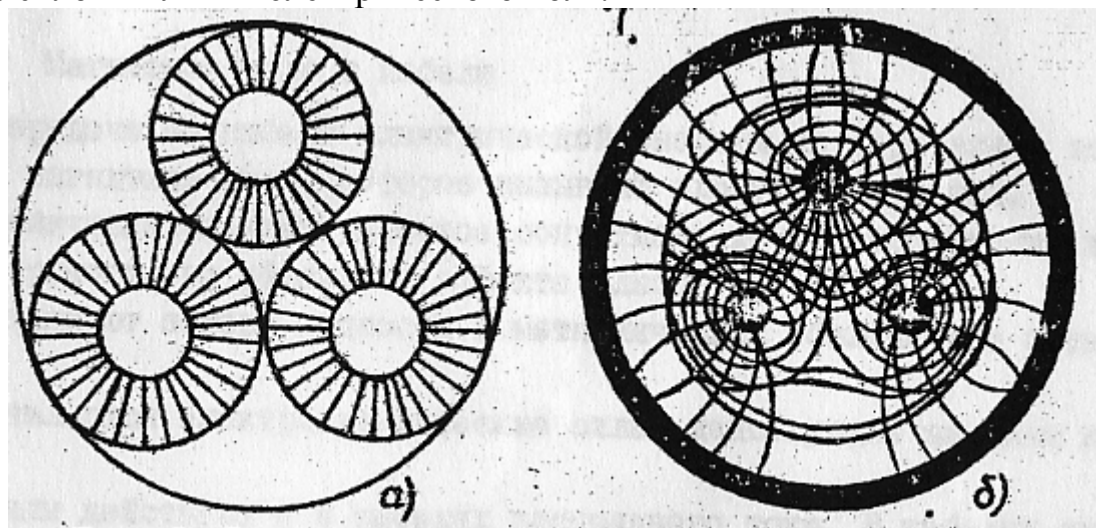


Рис. 6. – Электрическое поле трехжильного кабеля

В кабелях с поясной изоляцией (рис. 6б) все три жилы, междужильная изоляция, а также заполнение между изоляцией жил, электрическая прочность которого значительно ниже прочности жильной изоляции, оказывается под воздействием электрического поля напряженностью, в  $\sqrt{3}$  раз большей напряженности изоляции фаз.

Силовые линии напряженности электрического поля в кабеле с отдельными металлическими оболочками (как это видно из рис.6) имеют радиальное направление – от жилы перпендикулярно слоям бумажной изоляции, где электрическая прочность кабельной бумаги очень велика. В кабеле с поясной изоляцией есть составляющая напряженности электрического поля, направленная вдоль оси кабеля (параллельно слоям намотки бумажной изоляции), где электрическая прочность кабельной бумаги на порядок меньше, чем в радиальном направлении.

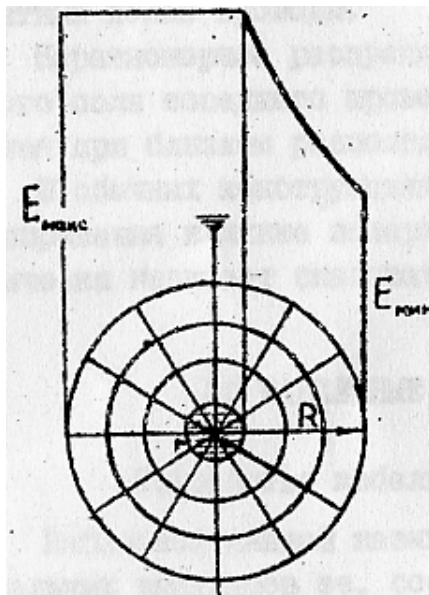
Поэтому кабели с поясной изоляцией изготавливают на напряжение не выше 10 кВ, кабели 20 – 35 кВ изготавливают с отдельными металлическими оболочками изолированных жил.

Напряженность электрического поля  $E$  в любой точки изоляции, расположенной на расстоянии  $r_x$  от оси жилы, находящейся под напряжением  $U$ , определяется следующим уравнением [8].

$$E = \frac{U}{\left(r_x + \ln \frac{R}{r}\right)}, \quad (4)$$

где  $U$  – рабочее напряжение между жилой и металлической оболочкой кабеля, кВ;  $R$  – наружный радиус изоляции, мм;  $r$  – внутренний радиус изоляции, мм.

Из уравнения (4) и рис. 7 следует, что максимальную напряженность испытывает изоляция у жилы, где  $r_x = r$ . Минимальная напряженность в слое изоляции, расположенном под металлической оболочкой кабеля, то есть при  $r_x = R$ .



*Рис.7 – Напряженность радикального электрического поля в изоляции кабеля с отдельными металлическими оболочками на жилах*

Известно, что значения максимальных напряженностей электрического поля в разных слоях изоляции обратно пропорциональны их диэлектрическим проницаемостям

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}, \quad (5)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – напряженности электрического поля в разных слоях изоляции;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  - диэлектрические проницаемости изоляционных материалов в этих слоях.

Это свойство используют для выравнивания электрического поля и лучшего применения изоляционного материала, выполняя изоляцию двухслойной с различными значениями диэлектрической проницаемости используемых материалов. Изоляционный слой с большей диэлектрической проницаемостью располагают ближе к жиле.

Уравнение для вычисления максимальной напряженности электрического поля (4) относится к идеальному случаю, в котором жила представляет собой гладкую цилиндрическую поверхность с плотно прилегающей к изоляции металлической оболочкой.

В действительности жилы изготавливают также и не круглыми и не однопроволочными. Для сглаживания интенсивности поля на «ребрах» витков и обеспечения радиальности поля, скрученные из отдельных проволок жилы экранируют.

### Магнитное поле в кабеле

При передаче по кабелю электрической энергии на переменном токе возникает магнитное поле, которое вызывает следующие явления.

1. Увеличивается электрическое сопротивление токопроводящих жил из-за поверхностного эффекта и эффекта близости.
2. Возникают потери мощности в металлических оболочках и броне кабеля.
3. Появляются электродинамические силы, действующие на жилы кабеля.

Эти силы действуют и в кабелях постоянного тока. В кабелях переменного тока они создают вибрацию жил. В нормальном режиме работы кабелей эти силы невелики. Однако для кабелей с большой токовой нагрузкой при коротких замыканиях эти силы могут достигать сотен, тысяч ньютонов, что может создать опасность механического повреждения кабелей.

Первое явление (увеличение электрического сопротивления) можно прокомментировать следующим образом. Для синусоидального переменного тока в теории электромагнитного поля для проводящей среды получено уравнение [19]

$$\nabla^2 F = j\omega\mu\mu_0\gamma F, \quad (6)$$

где  $F$  - вектор напряженности электрического или магнитного полей;

$\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);

$\mu$  - относительная магнитная проницаемость среды;

$\gamma$  - удельная электрическая проводимость среды.

Из формулы (6) следует, что распространение тока в проводе зависит от параметра  $R = \sqrt{\omega\mu\mu_0\gamma}$ , имеющего размерность метр в минус первой степени.

При прохождении расстояния  $\delta_0 = \sqrt{\frac{2}{k}}$  в глубь поверхности проводящего тела

амплитуда электромагнитной волны убывает в  $\epsilon$  раз. Параметр  $\delta_0$ , условно называют глубиной проникновения.

Отношение сопротивления токопроводящей жилы при переменном токе  $R_{\sim}$  к сопротивлению ее при постоянном токе (омическому сопротивлению)

$R_m$  удобно выразить через коэффициенты  $y_n$  и  $y_b$ , учитывающие возрастание сопротивления вследствие поверхностного эффекта ( $y_n$ ) и эффекта близости ( $y_b$ ):

$$\frac{R_{\sim}}{R_m} = 1 + y_n + y_b \quad (7)$$

Поверхностный эффект – это возрастание сопротивления жилы, обусловленное вытеснением тока к поверхности проводника собственным магнитным полем провода.

Неравномерное распределение тока в проводе из-за влияния магнитного поля соседнего провода называют эффектом близости. Он проявляется при близком расположении соседних проводов (жил).

В обычных конструкциях кабелей на промышленной частоте питающего напряжения влияние поверхностного эффекта и эффекта близости практически начинает сказываться только для жил сечением 300 мм<sup>2</sup> и более.

## 2. КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

### Устройство кабельных линий электропередачи

Кабельной линией называется линия для передачи энергии или отдельных импульсов ее, состоящая из одного или нескольких параллельных кабелей с соединительными, стопорными и концевыми муфтами (разделками) и крепежными деталями [14].

Кабельные линии выполняют обычно из нескольких отрезков кабелей с ограниченной длиной (строительная длина кабеля 250 – 750 м). Соединение строительных длин кабелей между собой производят в муфтах, а присоединение их к зажимам электроприемников осуществляют муфтами и разделками. Количество соединительных муфт на 1 км кабельной линии не должно превышать шести [9].

Основное назначение муфт и разделок – герметизация кабелей в местах соединений и оконцеваний.

### Муфты и разделки

Рассмотрим принципиальное устройство кабельных муфт и разделок.

В соединительных муфтах жилы концов соединенных кабелей освобождают от изоляции и сваривают или спаривают в специальных гильзах. После этого вручную восстанавливают бумажную изоляцию фаз. Соединение трехжильных кабелей на напряжение до 1000 В можно помещать в чугунную муфту. При соединении кабелей 6 – 10 кВ поверх соединения надевают свинцовую муфту, концы которой припаивают к свинцовой оболочке кабеля. Через специ-



альные отверстия муфту заливают компаундом и помещают в защитные чугунные кожухи.

Применяют и другие конструкции соединительных муфт.

Например, конструкция соединительной муфты для кабелей напряжением 1 -10 кВ, заполненная эпоксидным компаундом (рис. 8).

Соединительные и концевые муфты для кабелей напряжением 35 кВ и выше имеют сложное устройство.

Соединительные муфты так же, как и кабели размещают в земле, воздухе и воде. Ответственные и стопорные муфты – в земле и в воздухе, изолирующие (концевые) – только в воздухе.

По окончании монтажа электрическая прочность муфты должна быть не ниже электрической прочности применяемого силового кабеля.

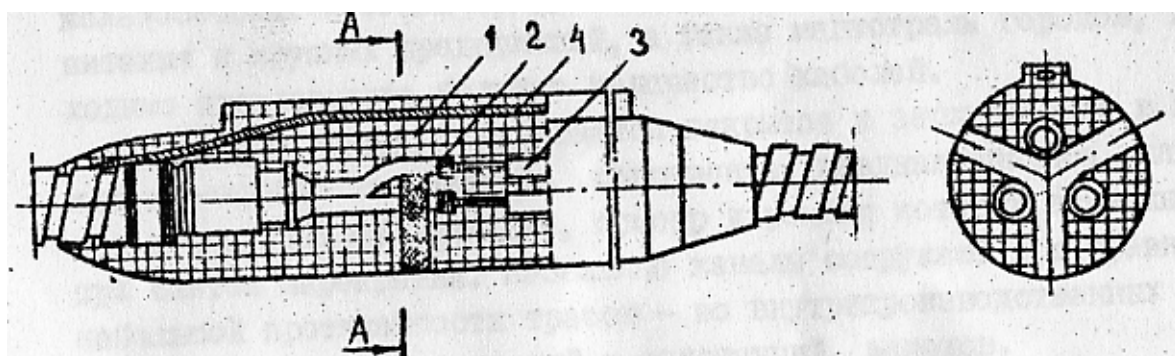


Рис.8. Соединительная муфта: 1 – корпус муфты; 2 – распорка; 3 – соединительная гильза; 4 – провод заземления

Все кабельные муфты должны удовлетворять требованиям герметичности, влагостойкости, механической и электрической прочности, высокой антикоррозионной защиты и удобства монтажа.

Учитывая перечисленные выше требования к кабельным муфтам, их классифицируют:

по виду изоляции кабеля, для которого они предназначены (пропитанная бумажная, резиновая, пластмассовая);

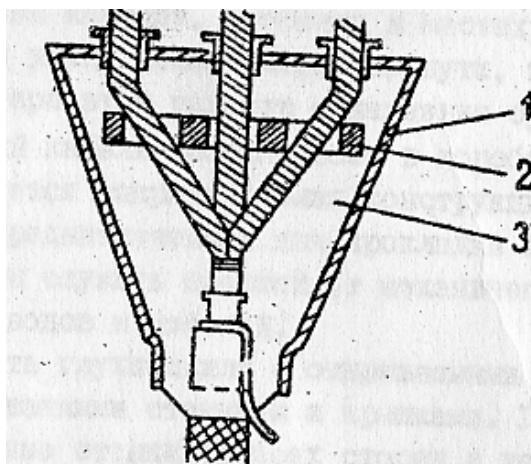
по материалу, из которого изготовлен их корпус (Ч – чугунная, С – свинцовая, Л – латунная, Э – эпоксидная, из смеси эпоксидных смол с наполнителями);

по конструктивному исполнению (О – однофазная, без обозначения – трехфазная);

по назначению (соединительная, концевая).

Концевые разделки так же, как и концевые муфты имеют только одну среду для размещения – воздух, но в отличие от последних применяют их только для внутренних установок и для кабелей до 10 кВ.

Длина снятых внешних оболочек кабеля, обнажающих его изоляцию при разделке, зависит от рабочего напряжения и от относительной влажности помещений, в которых размещаются концевые разделки. Концевая разделка в простейшем случае (рис. 9) выполняется в стальной концевой воронке 1, имеющей распорку 2 и заливаемой маслобитумным составом 3.



*Рис.9 – Концевая разделка  
Требования к электрической прочности разделок после их монтажа те же, что и для муфт.*

## Кабельные сооружения

Кабельные линии прокладывают в специальных сооружениях. Рассмотрим эти сооружения, и требования существующих правил по прокладке в них (сооружениях) кабелей.

**Кабельным сооружением** называется сооружение, специально предназначенное для размещения в нем кабелей, кабельных муфт, а также другого оборудования, обеспечивающего нормальную работу кабельной линии. К кабельным сооружениям относятся [14] кабельные туннели, каналы, шахты, этажи, блоки, эстакады, галереи, а также подпитывающие пункты, двойные полы, короба, лотки.

Кабели в специальных кабельных сооружениях рекомендуется прокладывать при большем количестве кабельных линий, чем при траншейной прокладке и наличии других подземных кабельных сооружений.

**Кабельным туннелем** называется закрытое сооружение (коридор) с расположенными в нем опорными конструкциями для размещения кабелей и кабельных муфт, со свободным проходом людей по всей длине, позволяющим производить прокладку кабелей, ремонты и осмотры кабельных линий.

Туннели могут быть круглого и прямоугольного сечения, проходными и полупроходными (пониженной высоты – 1,5 м). Последние сооружают только для кабелей напряжением до 10 кВ. Кабели располагают в туннелях с двух сторон, по одному или несколько на опорной конструкции, при общем количестве 20 – 50. Выполняют туннели из сборного железобетона. Местами сооружения туннелей являются территории центра питания и крупных предприятий, а также магистрали городов, где необходимо прокладывать большое количество кабелей.

**Кабельным каналом** называется закрытое и заглубленное в грунт, пол или перекрытие непроходное сооружение, предназначенное для размещения в нем кабелей, укладка, осмотр и ремонт которых возможны лишь при снятом перекрытии. Кабельные каналы сооружают при сравнительно небольшой протяженности трассы – во внутрипроизводственных помещениях, на территории станций и подстанций, заводов.

Для вертикальной прокладки кабелей в зданиях, подземных выработках, туннелях глубокого заложения используют кабельные шахты. Их выполняют в виде вертикального кабельного сооружения с высотой в несколько раз большей стороны сечения и снабжают скобами или лестницами для передвижения людей.

Для пространственного размещения кабелей в распределительных устройствах центра питания сооружают кабельные этажи и двойные полы.

**Кабельным этажом** называется часть здания, ограниченная полом и перекрытием или покрытием, с расстоянием между полом и выступающими частями перекрытия или покрытия не менее 1,8 м.

**Двойным полом** называется полость, ограниченная стенами помещения междуэтажным перекрытием и полом помещения со съёмными плитами.

**Кабельным блоком** называется кабельное сооружение с трубами (каналами) для прокладки в них кабелей с относящимися к нему колодцами. Кабельные колодцы сооружают в местах изменения направления трассы кабельной линии, перехода кабелей из блоков в землю, а также на прямолинейных участках трассы, определяемых силой предельно допустимого натяжения. Прокладка кабелей в блоках допускается лишь в исключительных случаях (в местах пересечения с железнодорожными путями и проездами, в условиях чрезвычайной стесненности по трассе), поскольку в блоках плохие условия охлаждения, а при повреждении требуется замена кабеля между соседними колодцами, в то время как при других способах прокладки для этого достаточно небольшой кабельной вставки длиной 3 – 5 м.

Кабельные эстакады и галереи используют для надземной прокладки кабелей. Эти кабельные сооружения применяют там, где непосредственная прокладка силовых кабелей в земле является опасной из-за агрессивности почвы, оползней, обвалов, вечной мерзлоты и т.д.

**Кабельной эстакадой** называется надземное или наземное открытое горизонтальное или наклонное протяженное кабельное сооружение. Такая эстакада может быть проходной или непроходной.

**Кабельной галереей** называется надземное наземное закрытое полностью или частично (без боковых стен) горизонтальное или наклонное протяженное проходное кабельное сооружение.

Возможна прокладка кабелей, особенно в местах перехода через дорогу, проезжие части улиц, железнодорожные пути, в асбоцементных или чугунных трубах, при этом условия охлаждения будут плохими.

Внутри помещений кабели прокладывают в коробах и лотках.

**Коробом** называется закрытая полая конструкция прямоугольного или другого сечения, предназначенная для прокладки в ней проводов и кабелей.

Короб должен служить защитой от механических повреждений проложенных в нем проводов и кабелей.

Короба могут быть глухими или с открываемыми крышками. Глухие короба должны иметь только сплошные стенки со всех сторон и не иметь крышек. Короба могут применяться в помещениях и наружных установках.

**Лотком** называется открытая конструкция, предназначенная для прокладки в ней проводов и кабелей.

Лоток не является защитой от внешних механических повреждений проложенных на нем проводов и кабелей. Лотки должны изготавливаться из несгораемых материалов. Они могут быть сплошными, перфорированными или решетчатыми. Лотки могут применяться в помещениях и наружных установках.

В большинстве случаев кабели прокладывают без использования специального сооружения – непосредственно в земляных траншеях.

Размещение кабелей в траншее – наиболее доступный способ канализации электроэнергии, так как не требует большого объема строительных работ и создает удовлетворительные условия для охлаждения кабелей. Недостаток этого способа прокладки – возможность механических повреждений кабелей во время различных раскопок, проводимых при эксплуатации зданий и сооружений, поскольку существующие способы защиты кабельных линий (кирпич, бетонные плиты) малоэффективны.

Прокладку кабелей в траншеях осуществляют на трассах, не загруженных другими подземными и наземными коммуникациями, причем при малом числе кабелей. В одной траншее прокладывают не более шести кабелей напряжением 6 – 10 кВ или двух кабелей 35 кВ. Кроме того, допускается прокладка в одной траншее не более одного пучка из четырех контрольных кабелей. При большом числе кабелей рекомендуется их прокладывать в отдельных траншеях с расстоянием между группами кабелей не менее 0,5 м или в каналах, туннелях, на эстакадах и в галереях.

На участках, подверженных интенсивной почвенной коррозии или действию блуждающих токов, и там, где может быть разлит горячий металл, прокладку кабелей в траншеях не применяют [10].

Для прокладки кабеля в траншее в нее насыпают слой просеянной земли или песка высотой 100 мм. На этот слой (подушку) укладывают кабель, который сверху покрывают кирпичом или плитами для защиты от механических повреждений. После этого траншею полностью засыпают грунтом.

В табл. 3 приведены некоторые способы прокладки кабелей.

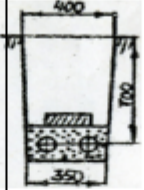



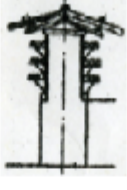

## **Проектирование кабельных линий**

Проектирование и сооружение кабельных линий должны производиться на основе технико-экономических расчетов с учетом развития сети, ответственности и назначения линии, характера трассы, способа прокладки, конструкций кабеля и т.п. [14].

Для кабельных линий, прокладываемых по трассам, проходящим в различных грунтах и условиях окружающей среды, выбор конструкций и сечений кабелей

следует производить по участку с наиболее тяжелыми условиями, если длина участков с более легкими условиями не превышает строительной длины кабеля. При значительной длине отдельных участков трассы с различными условиями прокладки для каждого из них следует выбирать соответствующие конструкции и сечения кабелей.

Таблица 3

Условия прокладки кабелей	Кабельные сооружения					
	земляная траншея	блок	туннель	канал	эстакада	коллектор
						
Прокладка большого количества кабелей на территории станций и подстанций промышленных предприятий			+	+		
Прокладка различных коммуникаций по городским магистралям и территории крупных предприятий						+
Прокладка с пересечением железнодорожных путей, поездов, шоссе и т.п.		+				
Прокладка на территории городов, промышленных предприятий	+					
Наземная прокладка					+	

Для кабельных линий, прокладываемых по трассам с различными условиями охлаждения, сечения кабелей должны выбираться по участку трассы с худшими условиями охлаждения, если длина его составляет более 10 м. Допускается для кабельных линий до 10 кВ, за исключением подводных, применение

кабелей разных сечений, но не более трех при условии, что длина наименьшего отрезка составляет не менее 20 м.

Вышеуказанные общие положения ПУЭ позволяют выбрать марку кабеля. Более подробно остановимся на определении сечения кабеля.

Для определения сечения кабеля необходимо знать токи на участках сети, для которых рассчитываются сечения. Токи нормального режима максимальной нагрузки необходимы для определения сечения по нагреву и экономической плотности тока, токи установившегося послеаварийного режима – для проверки по нагреву. Токи короткого замыкания – для проверки кабелей на термическую стойкость. По условиям потерь на корону сечения кабеля не проверяется, так как это явление в кабельных линиях при рассматриваемых напряжениях не возникает. Кроме того, сечения кабеля должно быть проверено по условию потерь напряжения.

Окончательно выбирается наибольшее из определенных по вышеприведенным условиям сечение кабеля. Следует заметить, что определяющими условиями при выборе сечения кабеля, как правило, являются нагрев и термическая стойкость.

### **Выбор сечения кабеля по нагреву**

Выбор сечения производят по предельно допустимому нагреву с учетом не только нормальных, но и послеаварийных режимов. При проверке на нагрев принимается получасовой максимум тока кабеля.

При повторно-кратковременных и кратковременных режимах работы электроприемников в качестве расчетного тока следует принимать ток, приведенный к длительному режиму.

Для неполностью загруженных кабелей напряжением до 10 кВ с бумажной пропитанной изоляцией может допускаться кратковременная перегрузка [14, табл. 1.3.1.]. В послеаварийных режимах независимо от предварительной загрузки допускается перегрузка кабелей как с бумажной, так и с пластмассовой изоляцией. При этом следует учитывать срок эксплуатации кабеля [14].

Условие выбора сечения кабеля по нагреву можно записать в виде

$$I_{\text{наиб}} \leq I_{\text{доп}}, \quad (8)$$

где  $I_{\text{наиб}}$  - наибольший ток, протекающий по рассматриваемому участку сети;  $I_{\text{доп}}$  - длительно допустимый ток с учетом внешних условий, способа прокладки, марки кабеля.

В общем случае:

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{T}} k_{\text{y}} k_{\text{в}} k_{\text{п}} k_{\text{з}} k_{\text{с}}, \quad (9)$$

где  $I_{\text{T}}$  - длительно допустимый ток для выбранной марки кабеля (табличное значение);  $k_{\text{y}}$  - коэффициент, учитывающий фактическую температуру окружающей среды;  $k_{\text{в}}$  - коэффициент, учитывающий количество параллельно проложенных кабелей;  $k_{\text{ч}}$  - коэффициент, отражающий фактическое тепловое сопротивление грунта;  $k_{\text{з}}$  - коэффициент, учитывающий перегрузку кабеля;  $k_{\text{с}}$  - коэффициент, учитывающий другие факторы, не учтенные коэффициентами

Все сомножители правой части выражения (9) определяют по таблицам ПУЭ[14].

### Проверка сечения кабеля по экономической плотности тока

Экономически целесообразное сечение кабеля определяют из соотношения:

$$F = \frac{I}{j_{\text{эк}}}, \quad (10)$$

где  $I$  – расчетный ток нормального режима работы в час максимума нагрузки, А;  $j_{\text{эк}}$  – нормированное значение экономической плотности тока для заданных условий работы, А/мм<sup>2</sup>.

Сечение, полученное по формуле (10), округляется до ближайшего стандартного. Значения  $j_{\text{эк}}$  зависят, кроме того, и от числа часов использования максимума  $T_m$  нагрузок и регламентированы ПУЭ[14]. Следует иметь в виду, что эти значения могут быть скорректированы.

Например:

1) При выборе сечений кабелей для питания  $n$  однотипных взаиморезервируемых электроприемников (насосов, механизмов собственных нужд и т.п.), из которых  $m$  одновременно находятся в работе, экономическую плотность тока можно увеличить в  $k$  раз по отношению к табличным значениям  $j_{\text{эк}}$  по формуле [14, табл.1.3]:

$$k = \sqrt{\frac{n}{m}}. \quad (11)$$

2) Выбор экономических сечений жил кабельных линий, имеющих промежуточные отборы мощности, следует производить для каждого из участков исходя из соответствующих расчетных токов участков. При этом для соседних участков допускается принимать одинаковые сечения, соответствующие экономическому сечению для наиболее протяженного участка, если разность между значениями экономического сечения для этих участков находится в пределах одной ступени по шкале стандартных сечений.

### Проверка кабеля по термической стойкости

Не все кабели необходимо проверять по условиям нагрева при коротком замыкании, например при защите их плавкими предохранителями. Все эти случаи оговорены в ПУЭ[14]. Если проверка кабелей на нагрев токами к.з. всё же производится, то она выполняется для:

- 1) одиночных кабелей одной строительной длины (к.з. в начале кабеля);
- 2) одиночных кабелей со ступенчатыми сечениями по длине (к.з. в начале каждого участка нового сечения);
- 3) пучка из двух и более параллельно включенных кабелей (к.з. непосредственно за пучком (по сквозному току к.з.)).

Для определения термической стойкости кабеля в качестве расчетного вида к.з. следует принимать трехфазное к.з.

При расчете термической стойкости в качестве расчетного времени следует принимать сумму времен, получаемую от сложения времени действия основной защиты (с учетом действия АПВ), установленной у ближайшего к месту к.з. выключателя, и полного времени отключения этого выключателя (включая время горения дуги).

Проверка заключается в том, что температура  $T_{кз}$ , до которой нагревается кабель под воздействием токов к.з., не должна превышать допустимой  $T_{доп}$  для данного вида изоляции:

$$T_{кз} \leq T_{доп}. \quad (12)$$

В условии (12) кроме вида изоляции имеет значение также класс напряжения кабеля.

В табл. 4 приведены значения допустимой температуры кабеля в зависимости от указанных факторов.

Таблица 4

Вид изоляции и класс напряжения	$T_{доп}$ , °С
Кабели с медными и алюминиевыми жилами с изоляцией (для всех классов напряжений)	
Поливинилхлоридной и резиновой	250
Полиэтиленовой	320
Кабели с бумажной пропитанной изоляцией на напряжении кВ	
До 10	200
20-220	125

Термически стойкое к токам к.з. сечение определяют по формуле [20]

$$F_{min} = \frac{I_{к}}{C} \sqrt{t_0}, \quad (13)$$

где  $I_{к}$  – действующее значение установившегося тока к.з., А;  $C$  - коэффициент, соответствующий разности выделенного тепла в проводнике до и после к.з.;  $t_0$  - приведенное расчетное время действия к.з., с.

Коэффициент  $C$  принимает значение [20]: для кабелей напряжением до 10 кВ с медными жилами – 165; для кабелей напряжением до 10 кВ с алюминиевыми жилами – 90.

### Пример выбора сечения

Рассмотрим пример решения задачи, связанной с определением сечения кабеля.

**Задача.** Вновь строящийся цех с наибольшей нагрузкой 3,2 МВт при  $\cos\phi = 0,8$  предположено запитать от шин 10 кВ подстанции двумя трехжильными кабелями. Оба кабеля будут проложены в общей траншее с расстоянием между ними в свету 100 мм. Высшая среднемесячная температура почвы по трассе  $\Theta$



. Оба кабеля будут находиться во взрывоопасной зоне класса 1. Технологический процесс в цехе не допускает перерыва в электроснабжении. Продолжительность использования наибольшей нагрузки цеха составляет 4000 ч в год. Установившееся значение тока к.з.  $I_k = 15 \text{ кА}$ . Время действия к.з. равно 0,4 с.

Определить сечение жил кабелей, соответствующее указанным условиям работы.

**Решение.** Конкретизируем задачу. На основании исходных данных:

1) в соответствии с ПУЭ п. 7.03.93 во взрывоопасной зоне класса 1 должны применяться кабели с медными жилами.

2) принимаем кабель с бумажной изоляцией.

3) поскольку по условию задачи технологический процесс не терпит перерыва в электроснабжении и не оговорена мощность, которую можно было бы отключить на время выхода из строя одного из кабелей, предполагаем, что оставшийся в работе кабель должен обеспечивать подачу в цех полной мощности.

Определим экономическое сечение.

Ток по каждой линии

$$I_p = \frac{3200}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0.8} = 115,47 \text{ А.}$$

При выходе из строя одного из кабелей ток по второму кабелю составит  $I_{p \text{ наиб}} = 230,94 \text{ А}$ .

Для заданной продолжительности использования наибольшей нагрузки  $T_m = 4000 \text{ ч}$  экономическая плотность тока  $j_{\text{эк}} = 2,5 \text{ А/мм}^2$  [14].

При этом экономическое сечение будет

$$F_{\text{эк}} = \frac{115,47}{2,5} = 46,19 \text{ мм}^2.$$

Принимаем ближайшее стандартное сечение жил кабеля  $50 \text{ мм}^2$  (с допустимым по нагреву током 180 А).

Проверяем возможность применения этого кабеля по условиям длительного нагрева.

А) Нормальный режим работы

Допускаемый ток по одному кабелю определяем в соответствии с формулой (9).

Поскольку по условию задачи характеристика грунта не задана, перегрузки кабелей не предусматриваются и другие факторы не оговариваются, принимаем три коэффициента из пяти равными:  $k_3 = k_{\text{п}} = k_{\sigma} = 1$ .

Тогда

$$I_{\text{доп}} = 0,94 \cdot 0,9 \cdot 180 = 152,28 \text{ А,}$$

где значения коэффициентов  $k_y$  и  $k_b$ , а также длительно допустимый ток  $I_T$  из (9) приняты для кабеля с изоляцией из пропитанной кабельной бумаги с допустимой температурой жилы кабеля на 10 кВ  $\Theta_{\text{доп}} = 60^\circ\text{С}$  [14].

Условие (8) для данного режима работы кабеля соблюдается, так как  $152,28 \text{ А} > 115,47 \text{ А}$ , то есть при этом режиме кабели с сечением жил  $50 \text{ мм}^2$  будут иметь температуру жил  $\Theta$  меньше предельно допустимой  $\Theta_{\text{доп}} = 60^\circ\text{С}$ .

Б) Послеаварийный режим работы (при выходе из строя одного из кабелей)

$$I_{\text{доп пар}} = 0,94 \cdot 180 = 169,2 \text{ А.}$$

Следовательно, один кабель не обеспечит подачи цеху полной мощности ( $I_{\text{р пар}} > I_{\text{доп пар}}$ ).

Ближайшее стандартное сечение, удовлетворяющее условию  $I_{\text{р наиб}} \leq I_{\text{доп пар}}$ , будет для сечения  $F_{\text{ст}} = 95 \text{ мм}^2$ , так как

$$I_{\text{доп пар}(95)} = 0,95 \cdot 265 = 249,1 \text{ А.}$$

Следовательно, эти кабели удовлетворяют условиям нормальной и послеаварийной работы.

Проверим кабель по термической стойкости.

Примем время действия выключателя равным 0,1 с.

Тогда расчетное время будет

$$t = 0,4 + 0,1 = 0,5 \text{ с.}$$

Минимальное сечение по термической стойкости в соответствии с (13)

$$F_{\text{min}} \frac{15000}{90} \cdot \sqrt{0,5} = 117,85 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, термическая стойкость определяет окончательное сечение кабелей  $120 \text{ мм}^2$  и эти кабели должны быть выбраны для прокладки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов В.А. Городские распределительные сети. – 2-е изд. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 224с.
2. Козлов В.А., Куликович Л.М. Прокладка, обслуживание и ремонт кабельных линий. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. 244с.
3. Кронихфельд Л.И., Рязанов И.Б. Теория, расчеты и конструирование кабелей и проводов. – М.: Энергия, 1972. -383с.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник.–М.: Интермет Инжиниринг,2007.–672с.
5. Основы кабельной техники / В.А.Привезенцев, И.И.Гроднев, С.Д.Холодный и др. – 2-е изд. – М.:Энергия, 1975. – 472с.
6. Электрические кабели, провода и шнуры: справочник / Н.И.Белорусов и др. – 6-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1998. -512с.
7. Производство кабелей и проводов /Под ред. Н.И.Белорусова и И.В.Петкова. – М.: Энергия, 1981. – 500с.
8. Сооружение и эксплуатация кабельных линий / Б.М.Баранов и др. – М.: Энергия, 1974. – 632 с .
9. Буслова Н.В. Электрические системы и сети. – Киев: Вища школа, 1988. – 584 с.
10. Коптев А.А. Монтаж кабельных сетей. – М.: Энергия, 1983. – 247 с.
11. Пантелеев Е.Г. Монтаж кабельных линий. – М.: Энергия, 1979. – 256 с.
12. Ларин Ю.Т., Плетнева И.М. Ленточные провода. – М.: Энергоиздат, 1982. – 162 с.
13. Михалков А.В. Электрические сети и системы в примерах и задачах: Учеб. Пособие для учащихся энергетических и энергостроительных техникумов. – М.: Энергия, 1967. – 160 с.
14. Правила устройства электроустановок. –7-е изд. – М.: Главгосэнергонадзор, 2003. – 640 с.
15. Козлов В.А. Электроснабжение городов. -3-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 264 с.
16. Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.
17. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – 3-е изд. – М.:Энергоатомиздат, 1985. – 350 с.
18. Петренко Л.И. Электрические сети: Сборник задач. – Киев: Вища школа, 1985. – 272 с.
19. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. –9-е изд. – М.: Высшая школа, 1996. – 559 с.
20. Липкин Б.Ю., Комаров Н.С. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Высшая школа, 1965. – 496 с.

Владимир Иванович Мошкин  
Василий Иванович Афтаев

## **КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ**

Методические указания к практическим занятиям по курсу  
«Электрические станции и подстанции систем электроснабжения»  
для студентов специальности 140211 «Электроснабжение»

Авторская редакция

---

Подписано к печати	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать трафаретная	Усл.печ.л.1,75	Уч.-изд. л. 1,75
Заказ	Тираж 5	Цена свободная

---

Редакционно-издательский центр КГУ.  
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.  
Курганский государственный университет.