

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Кафедра электротехники и электроэнергетики

Кабельные и воздушные линии электропередач

Методические указания к расчетно-лабораторным работам

Составители:
Г.П. Колесник
С.А. Сбитнев

Владимир 2016

УДК.621.311
ББК 22.332

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Биотехнические и электронные системы и технологии»,
Владимирского государственного университета
В.С. Грибакин

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Кабельные и воздушные линии электропередач (Электронный ресурс): Методические указания к расчетно-лабораторным работам / Сост.: Г. П. Колесник, С.А. Сбитнев, Владим. гос. ун-т. Владимир, 2016. 100 с.

Содержат описание шести расчетно-лабораторных работ, в каждой из которых приведены цель работы, объект и средства исследования, домашнее задание, порядок выполнения работ, методические указания, контрольные вопросы и учебная литература.

Методические указания составлены в соответствии с Федеральным Государственным образовательным стандартом для студентов направления 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения.

Табл.29. Ил. 33. Библиогр.: 6 назв.

УДК 621.311
ББК 22.332

ISBN

©Владимирский государственный
университет, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
В.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	4
Лабораторная работа № 1. Экспериментальное исследование конструкции силовых кабелей.....	8
Лабораторная работа № 2 Экспериментальное исследование сопротивления и диэлектрических потерь изоляции силовых кабелей	37
Лабораторная работа № 3 Моделирование воздушных линий электропередачи распределительных сетей	53
Лабораторная работа № 4 Моделирование кабельных линий электропередачи городских электрических сетей	65
Лабораторная работа № 5 Определение целости жил силовых кабелей и фазировка кабельных линий.....	77
Лабораторная работа № 6 Определение вида и места повреждения кабельных линий.....	88
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	100

ВВЕДЕНИЕ

Успешное решение вопросов энергоэффективности и энергосбережения связано с внедрением новых технологий в промышленности и современных технических средств генерирования и передачи электроэнергии до потребителя. Эти мероприятия позволяют увеличить коэффициент полезного действия при преобразовании энергии органических энергоносителей, запас которых ограничен, в электромагнитную и другие виды энергии. Кроме того, это позволит уменьшить потери электроэнергии до уровня потерь промышленно развитых европейских стран (6 – 7 %).

Важнейшей составляющей электроэнергетической системы являются линии электропередач (ЛЭП), к которым относятся воздушные (ВЛ) и кабельные (КЛ) линии электропередач.

Воздушная линия электропередачи (ВЛ) – устройство, предназначенное для передачи или распределения электрической энергии по проводам, находящимся на открытом воздухе и прикрепленным с помощью траверс (кронштейнов), изоляторов и арматуры к опорам или другим сооружениям (мостам, путепроводам). Обычно ВЛ состоит из трех фаз, поэтому опоры одноцепных ВЛ напряжением выше 1 кВ рассчитаны на подвеску трёх фазных проводов (одной цепи), на опорах двухцепных ВЛ подвешивают шесть проводов (две параллельно идущие цепи). При необходимости над фазными проводами подвешивается один или два грозозащитных троса. На опорах ВЛ распределительной сети напряжением до 1 кВ подвешивается от 5 до 12 проводов для электроснабжения различных потребителей по одной ВЛ (наружное и внутреннее освещение, электросиловое хозяйст-

во, бытовые нагрузки). ВЛ напряжением до 1 кВ с глухозаземлённой нейтралью помимо фазных снабжена нулевым проводом.

Кабельная линия электропередачи (КЛ) состоит из одного или нескольких кабелей и кабельной арматуры для соединения кабелей и для присоединения кабелей к электрическим аппаратам или шинам распределительных устройств.

В отличие от ВЛ кабели прокладываются не только на открытом воздухе, но и внутри помещений, в земле и воде. Поэтому КЛ подвержены воздействию влаги, химической агрессивности воды и почвы, механическим повреждениям при проведении земляных работ и смещении грунта во время ливневых дождей и паводков. Конструкция кабеля должна предусматривать защиту от указанных воздействий.

По величине номинального напряжения кабели делятся на кабели *низкого напряжения* (до 1 кВ), кабели *среднего напряжения* (6...35 кВ), кабели *высокого напряжения* (110 кВ и выше). По роду тока различают *кабели переменного и постоянного тока*.

Кабели выполняются *одножильными, двухжильными, трехжильными, четырехжильными и пятижильными*. Одножильными выполняются кабели высокого напряжения; двухжильными – кабели постоянного тока; трехжильными – кабели среднего напряжения.

Кабели низкого напряжения выполняются с количеством жил до пяти. Такие кабели могут иметь одну, две или три фазных жилы, а также нулевую рабочую жилу **N** и нулевую защитную жилу **PE** или совмещенную нулевую рабочую и защитную жилу **PEN**.

По материалу токопроводящих жил различают кабели с *алюминиевыми и медными жилами*. В силу дефицитности меди наибольшее распространение получили кабели с алюминиевыми жилами. В качестве изоляционного материала используется *кабельная бумага, пропитанная маслосанифольным составом, пластмасса и резина*. Различают кабели с нормальной пропиткой, обедненной пропиткой и пропиткой нестекающим составом. Кабели с обедненной или нестекающей пропиткой прокладывают по трассе с большим перепадом высот или по вертикальным участкам трассы.

Кабели высокого напряжения выполняются *маслонаполненными или газонаполненными*. В этих кабелях бумажная изоляция заполняется маслом или газом под давлением.

Защита изоляции от высыхания и попадания воздуха и влаги обеспечивается наложением на изоляцию герметичной оболочки. Защита кабеля от

возможных механических повреждений обеспечивается броней. Для защиты от агрессивности внешней среды служит наружный защитный покров.

Кабельную продукцию в зависимости от конструкций подразделяют на *кабели, провода и шнуры*.

Кабель – одна или более изолированных жил (проводников), заключенных, как правило, в металлическую или неметаллическую оболочку, поверх которой в зависимости от условий прокладки и эксплуатации может иметься соответствующий защитный покров, в который может входить броня.

Провод – одна неизолированная или одна и более изолированных жил, поверх которых в зависимости от условий прокладки и эксплуатации может иметься неметаллическая оболочка, обмотка и (или) оплетка волокнистыми материалами или проволокой.

Шнур – две или более изолированных или особо гибких жил сечением до $1,5 \text{ мм}^2$, скрученных или уложенных параллельно, поверх которых в зависимости от условий прокладки и эксплуатации могут быть наложены неметаллическая оболочка и защитные покрытия.

В.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Перед выполнением курса лабораторных работ по дисциплине «Кабельные и воздушные линии электропередач» каждый студент обязан изучить правила техники безопасности и расписаться в журнале, который находится в лаборатории.

При выполнении лабораторных работ студенты приобретают навыки подготовки, постановки, проведения и научного обоснования и подтверждения эксперимента, совершенствуют работу с измерительными приборами, учатся читать электрические и собирать соответствующие им электромонтажные схемы, обрабатывать и анализировать результаты эксперимента.

Лабораторные работы выполняются бригадами, состоящими из 2 – 3 студентов. Во время выполнения работы каждая бригада должна иметь бланк отчета с письменными ответами в соответствии с требованиями раздела 2 к каждой лабораторной работе и со всеми необходимыми расчетами, рисунками, графиками и таблицами.

Перед выполнением лабораторной работы каждый студент должен получить у преподавателя допуск к работе, который включает в себя проверку выполнения домашней подготовки, теоретическое обоснование эксперимента, знание методик проведения эксперимента. Студентам, допущенным к занятиям, дается разрешение на сборку схемы. Студенты, не подготовившиеся к занятиям, к выполнению работы не допускаются. Если студент имеет задолженность по двум незащищенным работам, то к выполнению следующей работы он также не допускается.

После выполнения лабораторной работы бригада студентов подписывает у преподавателя результаты опытов, затем разбирает схему и приводит стенд в порядок. Студенты, выполнившие, оформившие и защитившие работу в день выполнения, предъявляют один отчет на бригаду. При защите в последующие дни отчет оформляется каждым членом бригады.

Отчеты по лабораторным работам должны быть выполнены аккуратно на листах формата А4 писчей бумаги в соответствии со стандартом предприятия СТП 71.4-84. Все электрические схемы, графики и таблицы должны быть выполнены при помощи чертежных инструментов или на компьютере. Причем, все графики выполняют только на миллиметровой бумаге или с координатной сеткой на белой бумаге. Обозначения в электрических схемах должны соответствовать стандартам ГОСТ 2.105-95 (Дата актуализации: 06.04.2015), ГОСТ 2.702-2011, ГОСТ 2.747-68 (Дата последнего издания 01.01.2001), ГОСТ 8.417-2002, ГОСТ 1494-77 (Дата актуализации текста: 01.08.2013).

Отчет должен содержать:

- титульный лист с указанием кафедры, учебной группы, фамилии, имени и отчества студента, название, номер и дату выполнения лабораторной работы, Ф.И.О. преподавателя, принимающего работу;
- задание;
- цель работы, принципиальные электрические схемы и схемы соединений (электромонтажные);
- письменные ответы на каждый вопрос раздела «Подготовка к работе»;
- расчетные формулы с необходимыми вычислениями;
- таблицы измеренных и вычисленных величин;
- графики и диаграммы;
- краткие выводы.

Лабораторная работа № 1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Цель работы: В работе ставится цель – формирование у специалистов - энергетиков знаний в области передачи и распределения электрической энергии, о перспективах развития электроэнергетических систем и сетей, о новых методах транспорта электрической энергии. В результате проведения работы студенты должны знать методы построения электрических схем, методы расчёта режимов электрических сетей, методы проектирования сетей и их элементов; уметь использовать: базовые знания по теоретическим основам электротехники при решении вопросов получения, преобразования, передачи и распределения электрической энергии: математические модели для анализа режимов электроэнергетических систем; правила устройства электрических установок при проектировании системных объектов; приобрести навыки составления расчётных схем и их схем замещения с учетом параметров кабельных и воздушных линий; формулирования и постановки задач **расчёта** параметров установившихся режимов простейших электрических сетей; использования вычислительной техники для решения сетевых задач.

1.Объект и средства исследования.

Объектом исследования служат кабели, предназначенные для передачи и распределения электрической энергии, т. е. силовые, состоящие из следующих основных конструктивных элементов: токопроводящих жил, изоляции, оболочек и защитных покровов. Кроме основных элементов в конструкцию силовых кабелей могут входить экраны, нулевые жилы, жилы защитного заземления и заполнители. Токопроводящие жилы предназначены для прохождения электрического тока и делятся на основные и нулевые. Основные жилы предназначены для выполнения основной функции силового кабеля – передачи по ним электроэнергии. Нулевые жилы присоединяются к нейтрали источника энергии и предназначены для протекания разности токов фаз при неравномерной их нагрузке или неравенстве фазных напряжений (перекос фаз).

Согласно ПУЭ жилы защитного заземления являются вспомогательными жилами кабеля и предназначены для соединения не находящихся под рабочим напряжением металлических частей электроустановок, к которым подключен кабель с контуром защитного заземления источника энергии.

Все токопроводящие жилы кабеля изготавливаются из меди или алюминия. В соответствии со стандартами сопротивление медной токопроводящей жилы, пересчитанное на 1 мм² номинального сечения, 1 метр длины и приведенное к температуре 20°С должно быть не более 0,0178 Ом, алюминиевой жилы – не более 0,029 Ом. По форме токопроводящие жилы могут быть круглыми или фасонными (секторные, сегментные или другой формы) и изготавливаются однопроволочными и многопроволочными. Применение фасонных жил вместо круглых приводит к уменьшению диаметра кабеля на 20 – 25 % и соответственно к сокращению расхода материалов на изоляцию, оболочку и защитные покрытия. Поперечные сечения жил силовых кабелей показаны на рис.1.1, а номинальные значения сечений основных, нулевых и жил защитного заземления приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Жила	Номинальное сечение жилы, мм ²										
	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
Основная	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
Нулевая	6	10	16	16	25	25 - 35	35 - 50	35 - 70	50 - 70	50 - 95	70 - 120
Заземления	4	6	10	16	16	25	35	35	50	50	70

Необходимая электрическая прочность токопроводящих жил кабеля по отношению друг к другу и к заземленной оболочке (земле) обеспечивается изоляцией. Изоляция расположенная непосредственно на токоведущей жиле называется *изоляцией жилы*. Изоляция многожильного кабеля, наложенная поверх изолированных скрученных жил называется *поясной изоляцией*. В силовых кабелях используется бумажная пропитанная и пластмассовая изоляции и основным требованием, которое предъявляется к ней, является высокая электрическая прочность. Увеличение электрической прочности изоляции, позволяет уменьшить её толщину, что соответственно улучшает отвод тепла от жилы, позволяет увеличивать рабочий ток, уменьшает расход материалов на изготовление кабеля, а также повышает его гибкость.

Бумажная пропитанная изоляция – это многослойная изоляция из лент кабельной бумаги, наложенная в виде обмотки на токоведущую жилу и пропитанная изоляционным составом. В зависимости от вязкости пропиточного состава кабели с бумажной изоляцией изготавливаются с *вязким*, *обедненным* и *нестекающим* пропиточными составами. Для пропитки используется маслоканифольный составы марки МП-3 или МП-5, содержащие в разных пропорциях канифоль, полиэтиленовый воск и нефтяное масло.

В силовых кабелях на напряжения до 10 кВ применяется однослойная кабельная бумага марок К – 080, К – 120, К – 170 (толщина кабельной бумаги соответственно 0,08, 0,12, и 0,17 мм).

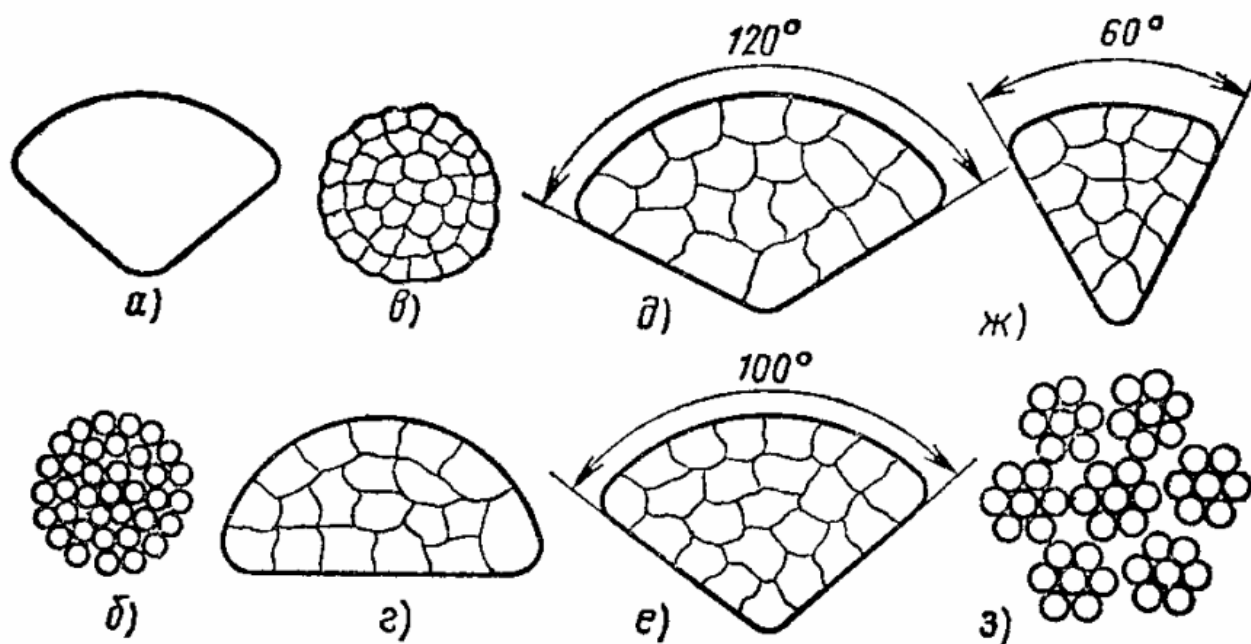


Рис. 1.1. Поперечные сечения токоведущих жил силовых кабелей: **а** — секторная однопроволочная жила; **б** — круглая многопроволочная неуплотненная жила; **в** — круглая многопроволочная уплотненная жила, **г** — сегментная многопроволочная уплотненная жила для двухжильных кабелей; **д** — секторная многопроволочная уплотненная жила для трехжильных кабелей; **е** — секторная многопроволочная уплотненная жила для четырехжильных кабелей; **ж** — секторная многопроволочная уплотненная нулевая жила для четырехжильных кабелей; **з** — многопроволочная жила сложной правильной концентрической скрутки из семи стренг.

Пластмассовая изоляция в виде сплошного слоя на токопроводящей жиле и поясная изоляция выполняются из поливинилхлорида, полиэтилена, этиленпропилена или сшитого полиэтилена.

Измерение токов, напряжений и мощности при выполнении лабораторной работы осуществляется амперметрами, ваттметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	электромагнитная	0÷250 В	1
3	Амперметр	электромагнитная	0÷300 А	2
4	Киловаттметр	электромагнитная	0÷100 кВт	1
5	Ваттметр	электродинамическая	0 – 3000 Вт	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

2. Подготовка к работе.

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 6 – 44], [2, с. 6 – 22].

2.2. Ознакомиться, с учетом п.2.1, с конструкциями силовых кабелей, выпускаемых различными заводами – изготовителями, и на лабораторных стендах изучить основные конструктивные элементы силовых кабелей. Выполнить эскизы поперечных сечений силовых кабелей с различными формами токопроводящих жил.

2.3. Изучить буквенные индексы (см. методические указания раздела 4), которые присваиваются различным конструктивным элементам силовых кабелей. Составить таблицу и провести сравнительный анализ основных технических характеристик выбранных или заданных марок силовых кабелей.

2.4. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с подробным изложением заданий раздела 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

3. Рабочее задание

3.1. Провести расчёт максимальной и средней напряжённостей электрического поля в изоляции для различных сечений (не менее двух) токопроводящей жилы одной выбранной марки кабеля (см. методические указания раздела 4).

3.2. Построить график зависимости максимальной напряженности от толщины изоляции для выбранной марки кабеля.

3.3. Построить модели силовых кабелей со слабо неоднородным и резко неоднородным электрическим полем.

4. Методические указания

Напряженность электрического поля в изоляции одножильного экранированного кабеля на поверхности радиусом r_x равна (кВ/мм) определяется по формуле

$$E = \frac{U}{r_x \ln R / r_1} \quad (1.1)$$

где U – напряжение между жилой и металлической оболочкой, кВ;

r_1 – радиус жилы или проводящего экрана поверх жилы, мм;

R – радиус по изоляции, мм.

Напряженность электрического поля у токопроводящей жилы радиусом r_1 будет максимальной, а напряженность у металлической оболочки радиусом R - минимальной.

Средняя напряженность электрического поля в изоляции составляет (кВ/мм)

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{R - r_1} \quad (1.2)$$

Значение максимальной напряженности электрического поля у поверхности жилы в трёхжильном кабеле с круглыми жилами при равной толщине жильной и поясной изоляции определяют следующим образом

$$E_{\text{макс}} = U_{\text{л}} \left(\frac{1}{2\Delta_{\text{из}}} + \frac{0,18}{r_1} \right), \quad (1.3)$$

При конструировании силовых кабелей используются специальные технические решения, которые позволяют реализовать заданные значения напряженности электрического поля, воздействующего на изоляцию по её поперечному сечению, например, применение градированной изоляции, экранов и т.д. Как правило, электрическое поле в силовом кабеле, неоднородно и характеризуется отношением:

$$K_{\text{н}} = E_{\text{макс}} / E_{\text{ср}}, \quad (1.4)$$

где $K_{\text{н}}$ – коэффициент неоднородности; $E_{\text{макс}}$ и $E_{\text{ср}}$ – соответственно максимальное и среднее значение напряженности электрического поля.

Различают слабо неоднородные $K_{\text{н}} < 3$ и резко неоднородные $K_{\text{н}} > 3$ электрические поля. Условие нормальной работы изоляции силового кабеля характеризуется соотношением

$$K_{\text{н}} E_{\text{ср}} < E_{\text{доп}}, \quad (1.5)$$

где $E_{\text{доп}}$ – допустимая напряженность электрического поля, при которой в изоляции кабеля отсутствуют частичные разряды в процессе воздействия испытательного или рабочего напряжения $U_{\text{возд}}$. Для выполнения этого условия толщина изоляции $\Delta_{\text{из}}$ между жилами и между жилой и оболочкой должна быть в $K_{\text{н}}$ раз больше, чем в однородном поле

$$\Delta_{\text{из}} > (U_{\text{возд}} / E_{\text{доп}}) K_{\text{н}} \quad (1.6)$$

Коэффициент использования изоляции определяется по формуле

$$\eta = \frac{r_1}{R-r_1} \ln \frac{R}{r_1}. \quad (1.7)$$

Экраны, как элементы конструкции силовых кабелей, предназначены для выравнивания электрического потенциала вдоль изоляционной конструкции, а также для защиты внешних цепей от влияния электромагнитных полей токов, протекающих по кабелю. В силовых кабелях на напряжения 6 – 10 кВ с бумажной изоляцией экраны располагаются на поясной изоляции и выполняются из электропроводящей кабельной бумаги марок КПУ – 80 и КПУ – 120.

В кабелях с пластмассовой изоляцией напряжением 6 кВ экраны накладываются на жилы и на поясную изоляцию. При этом материал экрана и изоляции должен быть одинаковым, чтобы в процессе эксплуатации между экраном и изоляцией не образовывалось пустот. Для устранения свободных промежутков между конструктивными элементами кабеля используются заполнители с целью герметизации, придания необходимой формы и механической устойчивости конструкции. В качестве заполнителей в кабелях с бумажной изоляцией применяются жгуты из сульфатной бумаги, пропитанной кабельной пряжи или штапелированной стеклопряжи. Для кабелей с пластмассовой изоляцией заполнение должно быть: при изоляции из полиэтилена, самозатухающего, вулканизирующего полиэтилена – из материала изоляции или из поливинилхлоридного пластиката; при изоляции из поливинилхлоридного пластиката – из поливинилхлоридного пластиката. Кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение 1 кВ допускается выполнять без заполнителей.

Оболочки силовых кабелей предназначены для предотвращения проникновения в изоляцию влаги, защиты её от воздействия света (солнечной радиации), различных химических веществ, а также предохранения от механических повреждений. В кабелях с бумажной изоляцией оболочки изготавливаются из свинца или алюминия. Свинцовые оболочки изготавливаются из свинца марок С-2 и С-3 с добавлением различных присадок, например, сурьмы. Алюминиевые оболочки изготавливаются прессованными из алюминия марки А или сварными из алюминия марки АД1. Пластмассовые – поливинилхлоридные и полиэтиленовые оболочки отличаются от изоляционного состава соответствующим подбором пластификаторов и стабилизаторов, которые обеспечивают повышенную стойкость

против светового (солнечная радиация) старения. Кроме того, эти оболочки более стойки к агрессивным средам по сравнению с алюминиевыми и свинцовыми.

Защитные покровы предназначены для защиты оболочки кабеля от внешних воздействий. В зависимости от конструкции кабеля в защитные покровы входят *подушка, бронепокров* и *наружный покров*.

Подушка – часть защитного покрова, наложенная на оболочку и предназначенная для предохранения оболочки от повреждения её лентами или проволокой брони.

Бронепокров – часть защитного покрова, состоящая из металлических лент или проволок и используемая для защиты кабеля от внешних механических воздействий.

Наружный покров – часть защитного покрова кабеля предназначенного для защиты брони от коррозии и выполненная из защитного шланга, выпрессованного из пластмассы или из волокнистых материалов, пропитанных специальным противогнилостным или негорючим составом.

Различным конструктивным элементам силовых кабелей присвоены буквенные индексы, которые приведены в табл.1.3.

Таблица 1.3

Индекс	Место расположения индекса в марке кабеля	Значение индекса	Примеры марок силовых кабелей
1	2	3	4
Токопроводящая жила			
А	На первом месте	Алюминиевая	ААБЛУ; ААШВУ; АСБУ
Нет	-----	Медная	АбЛУ; СБУ; ВВГ
(ож)	В конце обозначения	Однопроволочные жилы	ААБЛУ 3*120 (ож); ААШВУ 3*95 (ож)
Изоляция жил			
Нет	-----	Бумажная с вязкой пропиткой	ААБЛУ; ААШВУ; СБУ
В	В конце обозначения через дефис	Бумажная с обедненной пропиткой	ААБЛУ-В; СБУ-В; АСБУ-В
Ц	Впереди обозначения	Бумажная с неистекающей пропиткой	ЦААБл; ЦСБ; ЦАСБ
В	После индекса жил	Из поливинилхлорида	ВВГ
П	После индекса жил	Из полиэтилена	АПВГ; ПВГ
з	В конце обозначения	Заполнитель из поливинилхлорида	АВВГз; ВВГз

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4
У	В конце обозначения	Бумажная с повышенными температурами нагрева	ААБЛУ; ААШВУ; ААШпсУ
пс	В середине обозначения	Из самозатухающего полиэтилена	АпсВГ
пв	В середине обозначения	Из вулканизированного полиэтилена	АпвВГ
Пвс	В середине обозначения	Из вулканизированного самозатухающего полиэтилена	АПвсВГ
Р	В середине обозначения	Из резины	НРГ; ВРГ
Рт	В середине обозначения	Из резины повышенной теплостойкости	НРтГ; ВРтГ
Оболочка			
А	На первом или втором месте	Алюминиевая	ААБЛУ; ААШпсУ; АБЛУ
С	На первом или втором месте	Свинцовая	АСБУ; АСШВУ; СБУ
В	В середине обозначения	Поливинилхлоридная	АВВГ; АПВБШв; ПВГ
П	В середине обозначения	Полиэтиленовая	АВПГ; АППБ; АППГ
Г	После индекса оболочки	Кабель без защитного покрова	СГУ; АСГУ; ПВГ
Н	На первом или втором месте	Не распространяющая горение резиновая	НРГ; АНРГ
О	На первом или втором месте	Отдельная оболочка каждой жилы	АОСБУ; ОСБУ
Подушка под броней			
Нет	-----	Крепированная бумага, пропитанная битумом	АСБУ; СБУ; АСБГ
л	После индекса брони	Крепированная бумага, пропитанная битумом, и одна пластмассовая лента	АСБЛУ; ААБЛУ
2л	После индекса брони	Крепированная бумага, пропитанная битумом, и две пластмассовые ленты	ААБ2л; АСБ2ЛУ
в	После индекса брони	Выпрессованный полиэтиленовый шланг	ААБпУ; АБвУ
п	После индекса брони	Выпрессованный поливинилхлоридный шланг	ААБпУ; АБпУ
б	После индекса брони	Без подушки	ААББУ; АВВБШв
Броня			
Б	После индекса оболочки	Плоские стальные ленты	ААБЛУ; АСБУ; АВВБШвУ

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4
П	После индекса оболочки	Стальные оцинкованные плоские проволоки	СБГУ; АСПЛУ; СПЛУ
К	После индекса оболочки	Стальные оцинкованные круглые проволоки	СКУ; АСКУ
Наружный покров			
Нет	После индекса оболочки	Пропитанная битумом кабельная пряжа	ППБЛУ; АСБУ; АВВБ
Г	После индекса брони	Без наружного покрова на броне	СБГУ; АСБГУ; ААБЛГУ
н	После индекса брони	Негорючий состав из стеклянной ленты или пряжи	ААБЛУ; АСБЛУ
Шп	После индекса брони	Полиэтиленовый шланг	ААШЛУ; АВВБШп; АСШп
Шв	После индекса брони	Поливинилхлоридный шланг	ААШЛУ; ААБЛШЛУ
Шпс	После индекса брони	Шланг из самозатухающего полиэтлена	ААШЛУ

4.1. Силовые кабели напряжением до 35 кВ

Наиболее широко применяемыми в системах электроснабжения являются кабели на номинальное напряжение до 35 кВ включительно. На рис. 1.2,а приведен поперечный разрез кабеля напряжением 6...10 кВ. Общий вид такого кабеля показан на рис. 1.2,б.

Токопроводящие жилы 1 выполняются сегментообразными для придания кабелю цилиндрической формы. Жилы кабеля, как правило, многопроволочные, а для небольших сечений – монолитные. Каждая жила имеет свою фазную изоляцию 2. Все три жилы имеют поясную (общую) изоляцию 3. Бумажно-джутовые заполнители 8 служат, как и сегментообразные жилы, для придания кабелю цилиндрической формы. Герметичная оболочка 4 служит для защиты изоляции кабеля от высыхания и попадания влаги. Подушка 5 служит для защиты герметичной оболочки от механических повреждений броней 6, которая защищает кабель от механических повреждений. Наружный защитный покров 7 защищает стальную броню от агрессивности внешней среды.

Дополнительное усиление (в смысле электрической прочности) фазной изоляции общей (поясной) изоляцией объясняется параметрами режима кабельной линии. Кабельные сети напряжением 6...35 кВ работают с изолированной или компенсированной нейтралью и могут длительно работать в ре-

жиме замыкания одной фазы на землю. В нормальном режиме работы кабеля напряжение между каждой фазой и землей (металлической герметичной оболочкой) равно фазному напряжению, а напряжение между фазами – линейному. При отсутствии поясной изоляции между фазами силового кабеля имеется двойной слой фазной изоляции, рассчитанной на линейное напряжение, а между фазой и землей - один слой изоляции, рассчитанной на фазное напряжение.

В случае однофазного замыкания на землю напряжение одной фазы становится равным нулю, а напряжения относительно земли двух других фаз увеличиваются до линейного напряжения. Следовательно, изоляцию каждой фазы относительно земли необходимо выполнить не на фазное, а на линейное напряжение. При наличии общей поясной изоляции такой необходимости нет, поскольку между жилами кабеля имеются два слоя фазной изоляции, рассчитанной на линейное напряжение, между жилой и землей - тоже два слоя изоляции (слой фазной и слой поясной изоляции), рассчитанной на линейное напряжение.

Электрическое поле кабеля с общей металлической оболочкой не является однородным (рис. 1.2,в), что обуславливает экономическую нецелесообразность увеличение толщины изоляции при напряжениях более 10 кВ. Силовые линии имеют различные углы наклона к слоям бумажной изоляции. Электрическая прочность слоистой бумажной изоляции зависит от направления и в продольном направлении на порядок меньше, чем в поперечном.

Кабели на напряжение 20...35 кВ выполняют с отдельно свинцованными или отдельно экранированными жилами (рис. 1.3,а). Жилы 1 кабеля имеют круглую форму. Каждая фаза кабеля поверх бумажной изоляции фазы 2 имеет свою свинцовую оболочку 3 или слой тонкой перфорированной меди или металлизированной бумаги. Междуфазное заполнение кабельной пряжей 4 обеспечивает кабелю цилиндрическую форму. Стальная проволочная броня 5 и наружный защитный покров 6 выполняют те же функции, что и у кабелей 6...10 кВ.

Отдельная свинцовая оболочка или отдельный экран у каждой жилы создают эквипотенциальные поверхности вокруг изоляции каждой жилы и, следовательно, выравнивают электрическое поле и делают его радиальным по отношению к слоям бумажно-масляной изоляции (рис. 1.3,б). Толщина фазной изоляции в этом случае меньше, чем требовалось бы при неоднородном электрическом поле, конструкция кабеля получается экономически целесообразной.

В буквенно-цифровом шифре обозначения кабеля отражается материал жил, изоляции, наличие тех или иных защитных оболочек, указывается номинальное напряжение кабеля, количество и сечения токоведущих жил. В табл. 1.4 приведена расшифровка основных букв, используемых в маркировке кабелей.

Наличие буквы **Ц** (первая колонка табл.1.2) означает пропитку бумажной изоляции нестекающим церезином (горным воском). Нормальная пропитка не маркируется.

Буква **А** (вторая колонка) указывает, что жилы кабеля выполнены из алюминия. Медные жилы в маркировке кабеля не указываются.

Буква **О** (третья колонка) указывает, что каждая жила кабеля имеет собственную свинцовую оболочку или экран (отдельно оцинкованные или отдельно экранированные жилы).

Буквы **С** или **А** четвертой колонки обозначают металлическую (свинцовую или алюминиевую) герметичную оболочку. Буквы **П**, **В** и **Р** этой же колонки обозначают соответственно полиэтиленовую, поливинилхлоридную и резиновую герметичные оболочки. Буква **Н** соответствует найритовой (негорючей) оболочке.

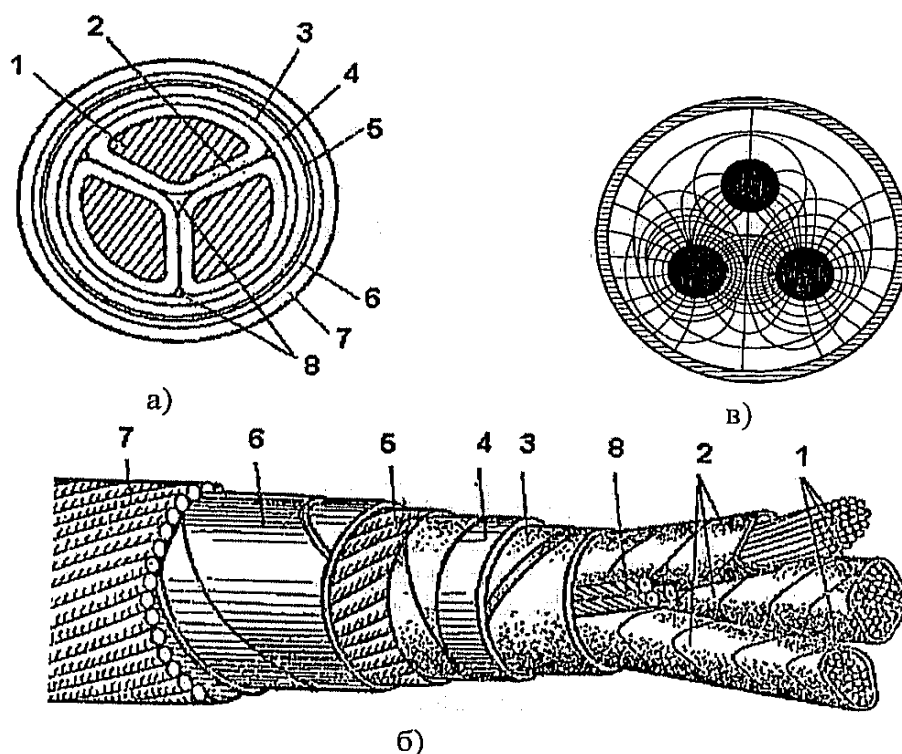


Рис. 1.2. Конструкция кабеля на напряжение 10 кВ.

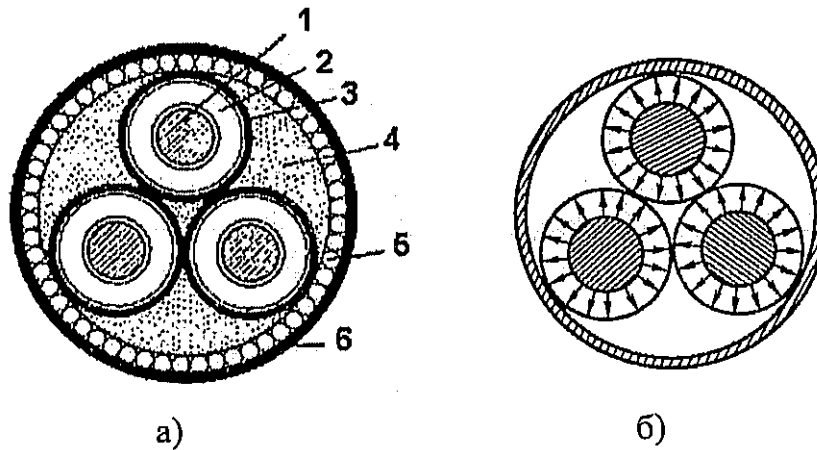


Рис. 1.3. Конструкция кабеля на напряжение 20. ...35 кВ

Таблица 1.4

Буквы, используемые в маркировке кабелей

1	2	3	4	5	6	7	8
Ц	А	О	С	П	Б	л	Г
			А	В	К	2л	Шв
			П	Р	П	в	Шп
			В				н
			Р				
			Н				

Пятая колонка букв табл. 1.4 характеризует материал изоляции кабеля. Буквы **П**, **В** и **Р** указывают, что изоляция выполнена из полиэтилена, поливинилхлорида и резины соответственно. Бумажно-масляная изоляция в маркировке кабеля не указывается.

Шестая колонка букв характеризует тип брони: **Б** - броня из стальных лент, **К** - из круглых проволок, **П** - из плоских проволок. Проволочная броня применяется у кабелей, работающих при значительных растягивающих усилиях.

Буквы седьмой колонки указывают на способ выполнения подушки под броней: **л** - один слой, **2л** - два слоя пластмассовых лент, **в** - шланг из поливинилхлорида.

Восьмая колонка букв характеризует наличие или отсутствие наружных защитных покровов. Отсутствие наружного покрова обозначается буквой **Г** (кабель голый); буквы **Шв** (**Шп**) означают наличие наружного защитного покрова из поливинилхлоридного (полиэтиленового) шланга; буква "**н**"

обозначает негорючий наружный покров. Кабели с покровами **Шв** и **Шп** применяются при высокой коррозионной активности грунта. Наружный защитный покров из пропитанной битумным составом хлопчатобумажной пряжи не маркируется.

С учетом изложенного по цифровому обозначению кабеля определяют его номинальное напряжение, количество и сечения жил. Например, кабель марки АСБУ10(3х185) – это кабель на напряжение 10 кВ, с тремя алюминиевыми жилами сечением 185 мм², бумажно-масляной изоляцией с повышенной температурой нагрева, свинцовой герметичной оболочкой, бронированный стальными лентами, с наружным защитным покровом из пропитанной битумным составом хлопчатобумажной пряжи.

4.2. Кабели напряжением 110 кВ и выше

Пропитка кабельной бумаги маслоканифольным составом не исключает появления в изоляции воздушных включений, которые существенно снижают электрическую прочность изоляции. Улучшение качества изоляции кабелей на напряжения 110 кВ и выше достигается специальной технологией их изготовления.

На напряжения 110 кВ и выше кабели изготавливаются одножильными маслонаполненными и представляют собой достаточно сложное техническое сооружение. Различают маслонаполненные кабели низкого (до 0,05 МПа) и высокого (1...1,5 МПа) давления. Первые изготавливаются на напряжения до...220 кВ, вторые – до 500 кВ.

Конструкция маслонаполненного кабеля низкого давления показана на рис. 1.4,а. Кабель имеет полую токопроводящую жилу 2, скрученную из отдельных медных проволок. Внутри жилы имеется канал 1, заполненный маслом под давлением, что исключает возможность образования пустот в бумажной изоляции 4 и значительно повышает ее электрическую прочность. По поверхности жилы накладывается экран 3 из полупроводящей бумаги. Такой же экран накладывается поверх бумажной изоляции. Далее идет свинцовая герметичная оболочка 5, подушка 6 из поливинилхлоридных лент, медные ленты 7, усиливающие свинцовую оболочку, броня 8 и наружный защитный покров 9. Маслопроводящий канал через специальные муфты соединяется с расположенными вдоль трассы баками давления.

Конструкция маслонаполненного кабеля высокого давления показана на рис. 1.4,б. Все три фазы уложены в стальной трубопровод 1, поверх которого

имеется антикоррозийное покрытие 7. Стальной трубопровод, являющийся защитой от механических повреждений, заполнен маслом 6 под избыточным давлением. Токоведущие жилы 4 из медных проволок имеют бумажную изоляцию 3 с вязкой пропиткой. Поверх изоляции наложен экран 2 из медных лент. Полукруглые проволоки скольжения 5 служат для механической защиты изоляции от повреждений при протягивании кабеля в стальной трубопровод.

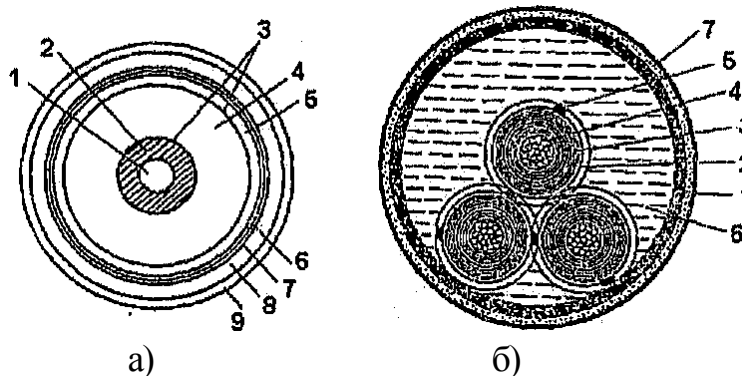


Рис. 1.4. Конструкции маслонаполненных кабелей низкого (а) и высокого (б) давления

4.3. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена

В настоящее время электротехнической промышленностью освоен выпуск кабелей с изоляцией из *сшитого полиэтилена*. Благодаря своей молекулярной структуре, такая изоляция обладает, по сравнению с известными типами изоляционными материалами, очень высокими термомеханическими свойствами и большой стойкостью к воздействию солнечной радиации и атмосферы.

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжения 6... 10 кВ изготавливаются как трехжильными, так и одножильными, на напряжения 35...500 кВ – одножильными. Конструкция одножильного кабеля на напряжение 10 кВ показана на рис. 1.5. Многопроволочная токоведущая жила 1 покрыта полупроводящей пластмассой 2. Изоляция из сшитого полиэтилена 3 также покрыта слоем полупроводящей пластмассы 4. Поверх экрана 5, выполненного из медных проволок, накладывается пластмассовая оболочка 6.

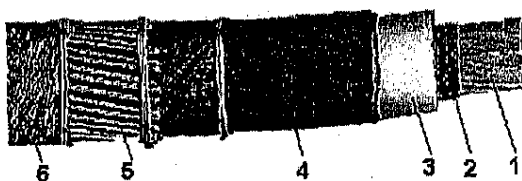


Рис. 1.5. Кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена

В буквенном обозначении таких кабелей указывается материал жилы (А - алюминиевая, отсутствие буквы - медная); материал изоляции (Пв - сшитый полиэтилен); материал оболочки (П - полиэтилен, В - поливинилхлорид). У кабелей с усиленной полиэтиленовой оболочкой в конце обозначения ставится прописная буква «у»; у кабелей с дополнительной герметизацией - буква «г». В цифровом обозначении кабеля указывается количество и сечение жил, сечение экрана и номинальное напряжение.

Благодаря высоким термомеханическим свойствам, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена допускают большие токовые нагрузки, чем кабели с бумажной пропитанной, обычной пластмассовой и резиновой изоляцией. Длительно допустимая температура жилы кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена составляет 90°C, для кабелей с бумажно-масляной изоляцией - 60°C. Для сравнения в табл. 1.5 приведены величины допустимых токов для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и бумажно-масляной изоляцией. Сравнимые кабели имеют алюминиевые жилы, номинальное напряжение 10 кВ, одинаковый способ прокладки (в земляной траншее).

Таблица 1.5

Изоляция кабеля	Допустимый ток при сечении жилы, мм							
	35	50	70	95	120	150	185	240
Сшитый полиэтилен	145	170	210	250	280	320	360	415
Бумажно-масляная	115	140	165	205	240	275	310	355

Отметим, что сравнительные потери электроэнергии в кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена при предельных токовых нагрузках увеличиваются на 35 – 55 %.

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена изготавливаются с сечением токоведущих жил до 1000 кв. мм.

4.4. Кабельная арматура

Главными составными элементами силовых кабельных линий являются:

- силовой кабель, служащий для передачи электроэнергии;
- соединительные муфты, при помощи которых отдельные строительные длины кабелей соединяются в одну линию;

- концевые муфты (заделки) и стопорные муфты, монтируемые на крупных участках трассы линии для предупреждения стекания кабельных масс;
- подпитывающие аппараты и системы сигнализации давления масс для линий выполненных маслонаполненными кабелями;
- кабельные сооружения – кабельные коллекторы, тоннели, каналы, шахты и колодцы.

В соответствии с ПУЭ за начало и конец КЛ принимают кабельные наконечники концевых муфт или заделок. Поскольку кабели выполняют отдельными отрезками строительной длины от 200 до 600 м различного сечения (для удобства транспортировки на кабельных катушках), то при сооружении КЛ эти отрезки соединяются друг с другом с помощью соединительных муфт. Основное назначение всех кабельных муфт это герметизация кабелей в местах соединения и окольцевания. Для герметизации изготовители выпускают кабель с запаянными концами, чтобы не было окисления изоляции (попадания воздуха и влаги) при транспортировке.

Для кабелей напряжением до 1000 В применяют эпоксидные или чугунные кабельные муфты. Для кабелей напряжением 6 – 10 кВ применяют термоусаживаемые, эпоксидные или свинцовые соединительные муфты (свинцовые служат только для соединения кабеля со свинцовой или алюминиевой оболочкой).

Концевые заделки кабелей в отличие от соединительных муфт размещаются только в одной среде (в воздухе). Для кабелей напряжением до 10 кВ применяются 3-х фазные концевые муфты. Для кабелей напряжением 35 кВ и выше – однофазные.

Таким образом, кабельная арматура предназначена для соединения отдельных кусков кабеля при выполнении монтажных и ремонтных работ, а также для подключения кабелей к различным электрическим аппаратам и шинам распределительных устройств.

Для соединения кабелей служат *соединительные муфты*. Подключение кабелей к аппаратуре на открытом воздухе и внутри помещений осуществляется с помощью *концевых муфт* и *концевых заделок* соответственно.

Соединяемые концы кабелей *разделяются*, т.е. последовательно со сдвигом 2...3 см удаляются все слои: наружная защитная оболочка, броня, подушка под броней и т.д. до токоведущей жилы. Одноименные жилы разделанных концов кабелей соединяются с помощью опрессовки в гильзах, пайки в гильзах или термитной сварки. После соединения жил восстанавливается фазная изоляция. Место соединения кабелей помещают в соединительную муфту. Для кабелей напряжением до 1 кВ применяются *чугунные муфты*. Для

кабелей более высокого напряжения - свинцовые, эпоксидные, термоусаживаемые муфты.

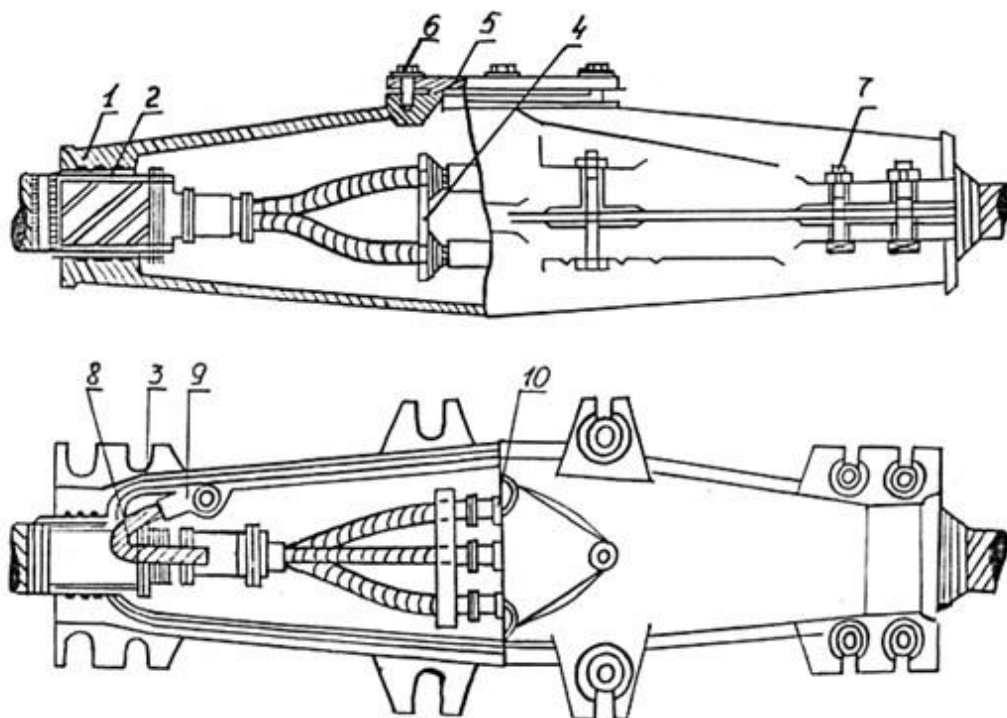


Рис. 1.6. Чугунная соединительная муфта для кабелей напряжением до 1 кВ
1- верхняя часть; 2- подмотка для смоляной ленты; 3 – нижняя часть муфты; 4 – фарфоровая распорка; 5 – крышка; 6 - болт крышки; 7 – стягивающий болт; 8 – провод заземления; 9 – наконечник; 10 – соединительная гильза

Соединение кабелей напряжением выше 1 кВ показано на рис. 1.7. Место соединения кабелей помещается в свинцовую муфту 1 (рис. 1.7,а), представляющую собой свинцовую трубу, концы которой прижимаются и припаиваются к металлическим герметичным оболочкам соединяемых кабелей. К корпусу свинцовой муфты и броне каждого из соединяемых кабелей припаивается проводник 2, обеспечивающий надежное заземление свинцовой муфты. Соединительные муфты кабелей на напряжения 6 и 10 кВ заключаются в свинцовый корпус, который при прокладке в земле в свою очередь помещается в чугунный кожух или кожух из стеклопластиков для защиты от коррозии и механических повреждений, рис.1.7.

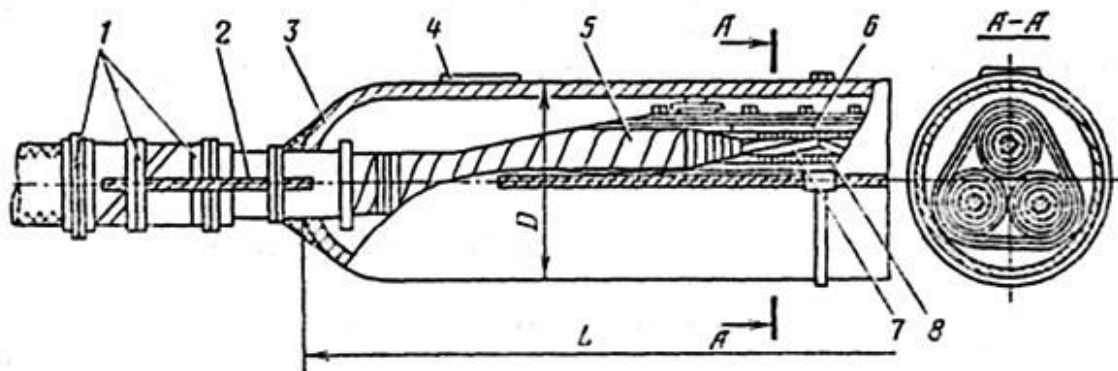


Рис. 1.7,а. Соединительная муфта в свинцовом корпусе для кабелей на напряжение 6, 10 кВ:

1 – бандаж; 2 – заземляющий провод; 3 – корпус муфты; 4 – заливочное отверстие; 5 – изоляция кабеля; 6 – подмотка из бумажных лент; 7 – токопроводящая жила; 8 – соединительная гильза

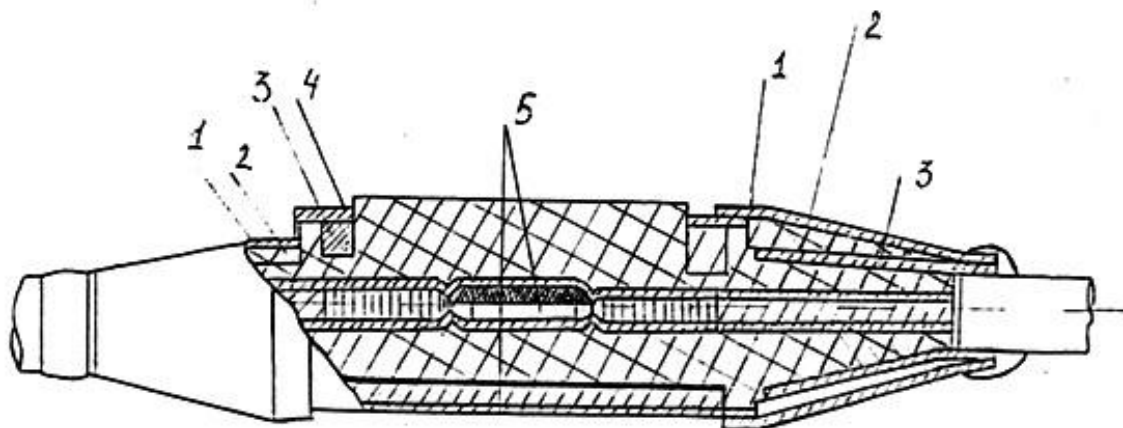


Рис. 1.7,б. Соединительная муфта для кабелей напряжением 35 кВ:

1 – экран конуса; 2 – конус; 3 – корпус; 4 – экран корпуса; 5 – место соединения

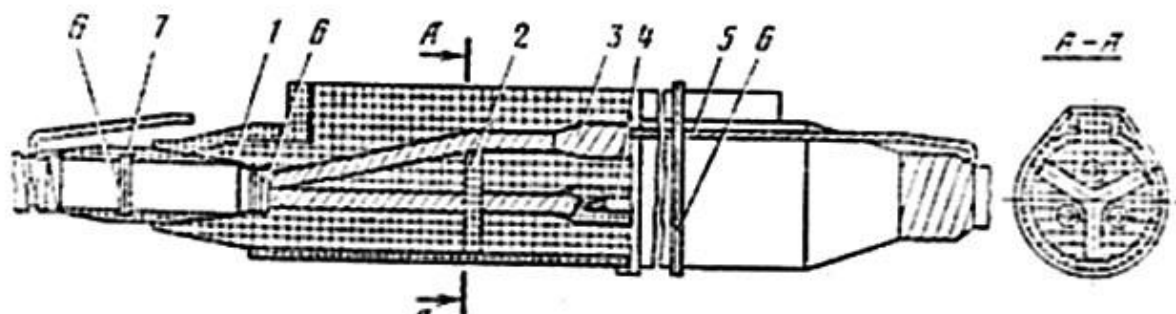


Рис. 1.7,в. Соединительная муфта в эпоксидном корпусе на напряжения 6 и 10 кВ:

1 – корпус; 2 – распорка; 3 – подмотка; 4 – соединение жил; 5 – провод заземления; 6- проволочный бандаж; 7 – герметизирующая подмотка

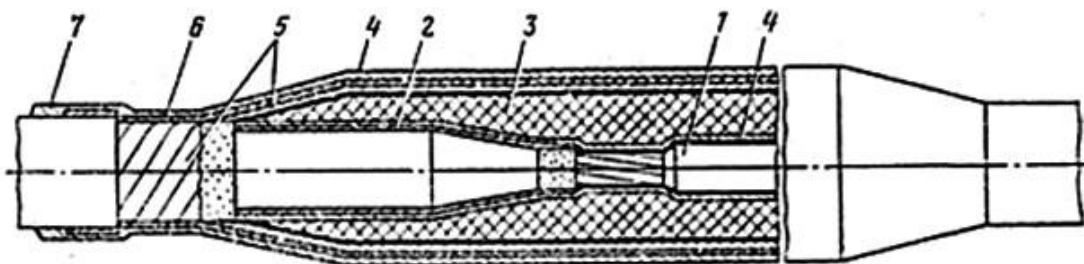


Рис. 1.7,г. Соединительная муфта для кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение 10 кВ:

1 – гильза соединительная; 2- адгезионный слой; 3 – изоляция из самосклеивающихся лент; 4 – полупроводящий экран; 5 – металлический экран; 6 – подмотка лентой из ПВХ-пластиката; 7 – наружный покров (термоусаживаемая трубка)



Рис. 1.7,д. Термоусаживаемая соединительная муфта на напряжения 6 и 10 кВ

Эпоксидные муфты имеют разъемный корпус. Соединение кабелей с помощью такой муфты показано на рис. 1.7,в. Для обеспечения надежного контакта между металлическими оболочками соединяемых кабелей эти оболочки соединяют с помощью пайки гибким медным проводником 5. Этот проводник припаивают к броне и герметичной оболочке каждого из соединяемых кабелей.

Внутренности чугунных и свинцовых муфт заливаются маслобитумной кабельной массой, в эпоксидных муфтах - эпоксидным компаундом. Для этого в чугунных и эпоксидных муфтах предусмотрены специальные отверстия, в свинцовой муфте эти отверстия прорезаются ножом и запаиваются после заливки.

Соединение кабелей с помощью термоусаживаемой муфты показано на рис. 1.7,д. В таких муфтах используются элементы (перчатки, шланги, манжеты) из термоусаживаемой пластмассы. Эти элементы надеваются на покрытые герметиком разделанные части кабеля. При нагревании теплофеном или паяльной лампой эти элементы усаживаются, плотно охватывая разделанные части кабеля.

Подключение кабеля к шинам или другой аппаратуре осуществляется с помощью *концевых муфт и концевых заделок*. Концевые муфты применя-

ются в наружных установках, концевые заделки - внутри помещений. Типовые конструкции таких муфт и заделок приведены на рис. 1.8.

Конец кабеля разделяется и помещается в *металлическую концевую муфту* 1 (рис. 1.8,а). Токоведущие жилы кабеля 2 соединяют со стержнями 3, проходящими через стержневые фарфоровые изоляторы 5. Концы стержней имеют резьбу для подключения кабеля к аппаратуре или шинам. По окончании монтажа муфту заливают кабельной массой. Проводник 4 припаивается к металлическим оболочкам кабеля, крепится к металлическому корпусу муфты резьбовым соединением и служит для заземления этого корпуса.

На рис. 1.8,б показана конструкция *концевой термоусаживаемой муфты*. Перчатка 1 из термоусаживаемой пластмассы надевается на разделанный конец кабеля, покрытый герметиком.

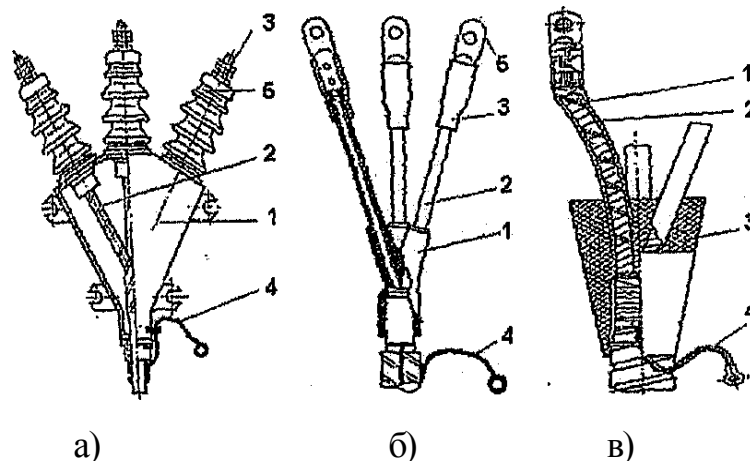


Рис. 1.8. Концевые муфты и заделки

Изолирующие трубки 2 выполняют роль фазной изоляции. Манжета 3, выполненная из термоусаживаемой пластмассы, защищает соединение токоведущей жилы с наконечником 5, предназначенным для непосредственного подключения токоведущих жил кабеля к шинам или аппаратам. Заземляющий проводник 4 припаивается к металлической оболочке и броне кабеля.

Конструкция *эпоксидной концевой заделки* показана на рис. 1.8,в. Токоведущие жилы 1 герметизируются и изолируются с помощью трехслойных пластмассовых трубок 2 в корпусе 3 из эпоксидного компаунда. Заземляющий проводник 4 припаивается к металлической оболочке и броне силового кабеля.

4.5. Способы прокладки кабельных линий

Способ прокладки КЛ выбирают в зависимости от числа кабелей, условий трассы, степени загрязненности и агрессивности окружающей среды, требований эксплуатации, экономичности и других факторов.

Прокладка КЛ в земляной траншее является одним из наиболее простых и экономичных способов. Глубина траншеи зависит от напряжения КЛ. Для КЛ напряжением до 10 кВ траншея имеет глубину 0,8 м, для КЛ напряжением 110 кВ – 1,5 м. Эскиз укладки кабеля напряжением до 10 кВ в земляную траншею приведен на рис. 2.8,а.

Дно траншеи покрывается слоем песка или просеянного грунта, на который укладываются в один ряд кабели. Расстояние между соседними кабелями d не менее 100 мм. Сверху кабели накрывают слоем песка или просеянного грунта. Выше укладываются железобетонные плиты или слой красного кирпича, служащие для защиты кабелей от механических повреждений при проведении земляных работ. Вместо защиты от механических повреждений может использоваться сигнальная лента из яркой полиэтиленовой пленки, свидетельствующая о близком расположении кабелей. Верхняя часть траншеи засыпается обычным грунтом с послойным трамбованием. В одной земляной траншее прокладывают не более *шести* кабелей. Это обусловлено тем, что с увеличением числа кабелей их условия охлаждения ухудшаются, допустимая токовая нагрузка кабелей уменьшается, эффективность использования кабелей снижается.

При числе кабелей более шести, идущих в одном направлении, их укладывают в отдельные траншеи. Расстояния между траншеями должно быть не менее 0,5 м. Если кабельная трасса пересекает какие-либо инженерные сооружения, например асфальтированные дороги, то в месте пересечения кабели укладывают в *асбоцементные трубы*.

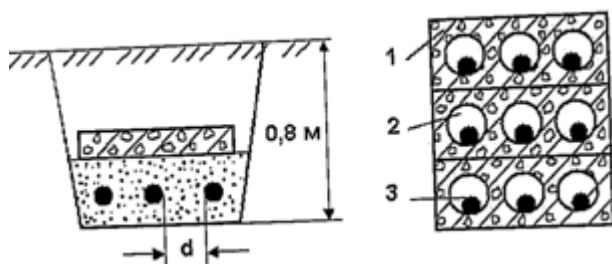


Рис. 1.9. Эскиз прокладки кабелей в земляной траншее (а) и бетонном блоке (б).

Прокладка КЛ в блоках используется при большой стесненности кабельной трассы и пересечениях с инженерными сооружениями, например с железными дорогами. Конструкции блоков могут быть различными. На рис.1.9,б показан бетонный блок, состоящий из бетонных панелей 1 с отверстиями 2, через которые прокладываются кабели 3. Через определенные расстояния сооружаются кабельные колодцы, в которых осуществляется соединение кабелей и через которые выполняется монтаж кабелей и замена поврежден-

ного кабеля. Это более дорогой способ прокладки, с худшими условиями охлаждения по сравнению с прокладкой кабелей в земляной траншее.

При прокладке в одном направлении большого количества кабелей (более 20), что характерно для электростанций и энергоемких промышленных предприятий, используются *кабельные тоннели, галереи и эстакады*. Эскиз прокладки кабелей в тоннеле показан на рис. 1.10,а. Тоннель 1 представляет собой сборную железобетонную конструкцию, в которой по кронштейнам 2 прокладываются кабели 3 разного напряжения и разного назначения (силовые и контрольные). Кроме кабелей, в тоннелях могут прокладываться и другие инженерные сети, например водопроводные 4. Размеры тоннеля позволяют проводить двухстороннее обслуживание кабелей.

Галереи и эстакады отличаются от тоннелей тем, что располагаются над поверхностью земли на специальных стойках. В этом случае для кабельной трассы отчуждается меньшая площадь. Галереи и эстакады в отличие от тоннелей используются на производствах, где возможны скопления горючих и взрывоопасных газов, тяжелее воздуха, и на предприятиях с большой агрессивностью почвы.

На территории подстанций и цехов промышленных предприятий КЛ прокладывают в *железобетонных каналах* (рис. 1.10,б). Верхний блок 1 является съемным, что обеспечивает удобное обслуживание кабелей.

В галереях, тоннелях, каналах и эстакадах с целью пожарной безопасности используются кабели без наружного джутового покрова.

Для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена используются все вышеперечисленные способы прокладки. При прокладке трехжильных кабелей в одной плоскости расстояние между соседними кабелями принимается равным диаметру кабеля d (рис. 1.9, а).

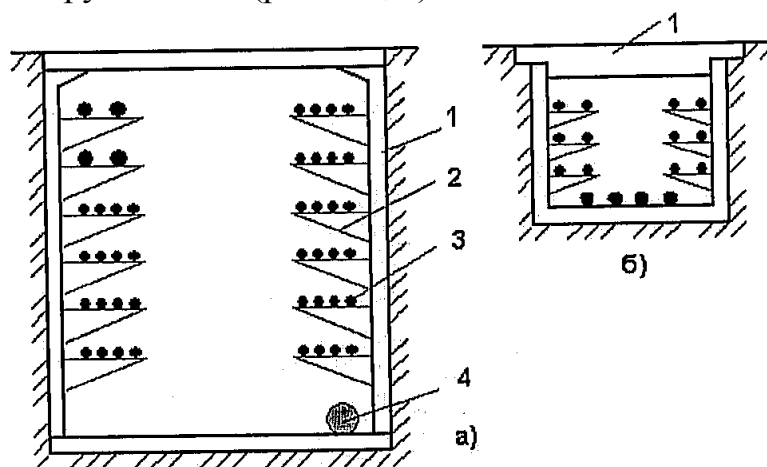


Рис. 1.10. Прокладка кабелей в тоннеле (а) и канале (б)

Одножильные кабели прокладываются треугольником и располагаются вплотную друг к другу (рис. 1.11,б). Расстояние между соседними пучками кабелей принимается равным удвоенному диаметру одножильного кабеля $2d$.

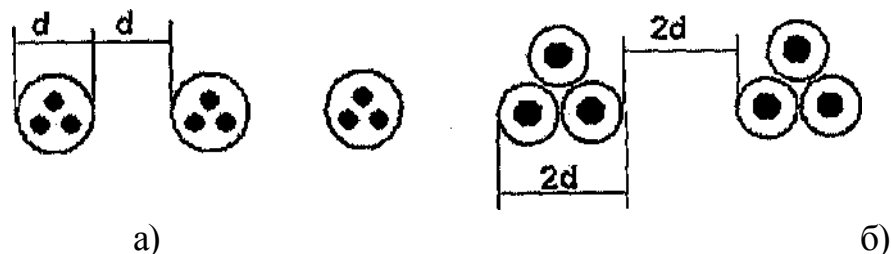


Рис. 1.11. Прокладка кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

4.6. КЛАССИФИКАЦИЯ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Среди многих систем классификации кабельных изделий основной является *классификация кабелей и проводов по назначению*. При этом различают:

1. **Неизолированные провода** – для использования при строительстве ВЛ. Провода изготавливаются из меди, алюминия, бронзы, а также комбинированием (стальной сердечник, поверх которого накладывается один или несколько повитков алюминиевой проволоки).
2. **Самонесущие изолированные провода** – для передачи электроэнергии по изолированным скрученным проводам в жгут, расположенным на открытом воздухе и прикрепленные при помощи узлов крепления к опорам.
3. **Силовые кабели** – для передачи и распределения электрической энергии. Кабели выпускаются с медными и алюминиевыми токопроводящими жилами с изоляцией из бумажных лент, пропитанных маслом или специальными составами, а также с изоляцией из ПВХ пластиката, полиэтилена, резины. Диапазон напряжений промышленной частоты силовых кабелей – от 660 В до 500 кВ. Кабели имеют свинцовые, алюминиевые или пластмассовые оболочки.
4. **Кабели связи** – для передачи сигналов связи и информации. Кабели имеют медные жилы и бумажную или пластмассовую изоляцию. Кабели имеют свинцовые, алюминиевые, стальные, пластмассовые или металлопластмассовые оболочки. Кабели связи делятся на высокочастотные и низкочастотные. Высокочастотные – это кабели дальней связи, низкочастотные – кабели местной связи (городские ПФ и т.д.)

5. **Контрольные кабели** – для питания приборов, аппаратов и других электротехнических устройств и используются в целях контроля. Контрольные кабели имеют токопроводящую жилу из меди, биметалла алюминий-медь, алюминия. Изоляция – в основном из ПВХ, ПЭ и резины. Число токопроводящих жил – от 4 до 37, сечения от 0,75 до 10 мм².

6. **Кабели управления** используются для целей дистанционного управления и имеют медные жилы. Изоляция – из ПЭ, ПВХ, фторопласт, резина. Число токопроводящих жил от 3 до 108. Все или отдельные токопроводящие жилы могут быть экранированными. Оболочки кабелей – пластмассовые. Поверх оболочки может накладываться панцирная броня из стальных проволок. Форма – круглая или плоская.

7. **Монтажные провода** используются для выполнения групповых соединений в различных схемах, в том числе и в жилых домах. Токопроводящие жилы – медные, в т.ч. с покрытиями из серебра, никеля и олова. Изоляция – ПЭ, ПВХ, фторопласты. Часть монтажных проводов выпускается с изоляцией на основе стекловолокна, волокон лавсана и капрон. Форма – круглые и ленточные.

8. **Установочные провода** – для распределения электрической энергии в силовых и осветительных сетях. Провода выпускаются одно и многожильными (до 30) и в основном рассчитаны на напряжение до 3 кВ. Токопроводящие жилы – алюминиевые, медные и биметалл Al + Cu. Изоляция ПЭ, ПВХ, резина, асбест, стекловолокно, резиностеклоткань. Диапазон сечений от 0,5 до 120 мм².

9. **Обмоточные провода** – для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов. Токопроводящие жилы – из меди, алюминия, сплавов сопротивлений (нитрон, манганин, константан). Изоляция – эмалевые покрытия на основе синтетических лаков, стекловолокно, шелк, пленки, бумага, пластмассы.

10. **Радиочастотные провода** – для передачи высокочастотной энергии между антеннами и различными радиотехническими и электронными устройствами. Кабели имеют коаксиальную конструкцию. Жилы – медные, изоляция из ПЭ или фторопласта. Поверх изоляции наложены экран и защитная оболочка из ПЭ или ПВХ пластмассы.

Кроме того выпускаются судовые, грузонесущие, геофизические кабели, для электрофильтров, бортовые провода, провода зажигания и др.

Основными направлениями развития кабельной техники является:

- повышение рабочих температур кабелей и проводов;

- микроминиатюризация кабельной продукции, связанная с уменьшением габаритов электронной и радиоаппаратуры;
- автоматизация производства кабелей и проводов;
- экономия цветных металлов.

4.7. Буквенные обозначения в маркировке кабелей

Буквенные обозначения в маркировке кабелей обусловлены конструкцией брони и защитных покровов и приведены в табл.1.6. Расшифровка обозначений применяемых силовых кабелей дана в табл. 1.7.

Таблица 1.6

Буква или сочетание букв	Значение буквы или сочетание букв
А	Алюминиевая жила (если буквы А нет – то медная жила)
АС	Алюминиевая жила и свинцовая оболочка
АА	Алюминиевая жила и алюминиевая оболочка
Б	Броня из двух стальных лент с антикоррозионным защитным покровом
Бн	То же, но с негорючим защитным покровом (не поддерживающим горение)
Г	Отсутствие защитных покровов поверх брони или оболочки
л (2л)	В подушке под броней имеется слой (два слоя) из пластмассовых лент
в (п)	В подушке под броней имеется выпрессованный шланг из поливинилхлорида (полиэтилена)
Шв (Шп)	Защитный покров в виде выпрессованного шланга (оболочки) из поливинилхлорида (полиэтилена)
К	Броня из круглых оцинкованных стальных проволок, поверх которых наложен защитный покров
н	Не поддерживающий горение защитный покров
П	Броня из оцинкованных плоских проволок, поверх которых наложен защитный покров
С	Свинцовая оболочка
О	Отдельные оболочки поверх каждой фазы
В - в конце обозначения через черточку (-В)	Обедненно-пропитанная бумажная изоляция

Продолжение таблицы 1.6

Ц	Бумажная изоляция, пропитанная нестекающим составом, содержащим церезин
НР	Резиновая изоляция и оболочка из резины, не поддерживающей горение
В	Изоляция или оболочка из поливинилхлорида
П	Изоляция или оболочка из термопластичного полиэтилена
Пс	Изоляция или оболочка из самозатухающего полиэтилена (не поддерживающего горение)
Пв	Изоляция из вулканизированного полиэтилена
Бб	Броня из профилированной стальной ленты
У	Для кабелей, изготовленных после 01.04.85. Изоляция может работать при температурах 80, 70, 65°C соответственно для кабелей на напряжения 6, 10, 20 и 35 кВ

Таблица 1.7

Маркировка силовых кабелей

Марка кабеля	Расшифровка
СБ	кабель с бумажной пропитанной изоляцией с медными жилами в свинцовой оболочке (С) с броней из стальных лент (Б) с защитными покровами из кабельной пряжи, пропитанной битумом
СБГ	то же, но без защитных покровов («голый»)
СГ	то же, но без защитных покровов
АСБ	то же, что СБ, но с алюминиевой жилой
ААБ	то же, но с алюминиевой оболочкой (А вместо С).
ОСБ	кабель с отдельно освинцованными жилами с броней из стальных лент с защитными покровами
ААШв	кабель с алюминиевыми жилами в алюминиевой оболочке и защитным покровом в виде шланга из поливинилхлорида.
ААБв	кабель с выпресованной оболочкой из поливинилхлорида (в) под броней из стальных лент (Б) с защитными покровами
СРБ	кабель с резиновой изоляцией, свинцовой оболочкой, с броней из стальных лент и защитными покровами
ВВГ	кабель с изоляцией из поливинилхлорида, оболочкой из поливинилхлорида
ПВГ	то же, но с изоляцией из термопластичного полиэтилена
ПсВГ	то же, но с изоляцией из самозатухающего полиэтилена без защитных покровов
ПвВГИ	то же из полиэтилена вулканизированного
ПОВБ	кабель с полиэтиленовой изоляцией, фазы которого заключены в отдельные экраны из медных лент и поливинилхлоридные оболочки в общей ленточной броней, с защитными покровами

5. Порядок оформления отчета.

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями стандарта ЕСКД и должен содержать схему или эскиз макета установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения и выводы, а также ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы

1. Основные конструктивные элементы силовых кабелей и их функциональное назначение.
2. В чём заключается принципиальное отличие силовых кабелей от электрических шнуров и проводов.
3. Конструкции токопроводящих жил силовых кабелей.
4. Перечислите ряд номинальных сечений токопроводящих жил силовых кабелей.
5. Укажите отличия между нулевыми, токопроводящими и жилами защитного заземления.
6. Назначение оболочки в силовых кабелях, и из каких материалов она изготавливается.
7. Перечислите основные виды изоляции, которые используются в силовых кабелях.
8. Характерные особенности градированной изоляции.
9. Функциональное назначение поясной изоляции и её размещение в силовом кабеле.
10. Объясните назначение экранов в силовых кабелях и перечислите материалы, из которых они изготавливаются.
11. Способы регулирования электрического поля в силовых кабелях.
12. Укажите, с какой целью в силовых кабелях применяются заполнители.
13. Объясните, как определить коэффициент использования изоляции.
14. Перечислите материалы, из которых изготавливают изоляцию силовых кабелей.
15. Перечислите буквенные индексы, которые используются для обозначения изоляции в марках силовых кабелей.
16. Перечислите буквенные индексы, которые используются для обозначения оболочки в марках силовых кабелей.

17. Перечислите буквенные индексы, которые используются для обозначения брони в марках силовых кабелей.
18. Перечислите буквенные индексы, которые используются для обозначения наружного покрова в марках силовых кабелей.
19. Приведите формулу, с помощью которой определяется максимальное значение напряженности электрического поля в трёхжильном кабеле.
20. Приведите формулу, с помощью которой определяется напряженность электрического поля в изоляции одножильного кабеля.
21. Какие сведения дает буквенно-цифровой код о силовом кабеле?

Лабораторная работа № 2.

Экспериментальное исследование сопротивления и диэлектрических потерь изоляции силовых кабелей

Цель работы: В работе ставится цель – изучение методики экспериментального определения электрического сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь, электрической емкости силовых кабелей и оценка влияния внешних факторов на данные параметры. В результате проведения работы студенты должны знать методы измерения электрического сопротивления и диэлектрических потерь изоляции силовых кабелей; уметь использовать: базовые знания по теоретическим основам электротехники при решении вопросов получения, преобразования, передачи и распределения электрической энергии: математические модели для анализа режимов электроэнергетических систем; правила устройства электрических установок при проектировании системных объектов; приобрести навыки работы с мегаомметрами и приборами для измерения диэлектрических потерь, которые рекомендуется применять для проведения измерений, составления расчётных схем и их схем замещения с учетом измеренных параметров кабельных линий; формулирования и постановки задач **расчёта** параметров установившихся режимов простейших электрических сетей; использования вычислительной техники для решения сетевых задач.

1. Объект и средства исследования.

Объектом исследования служат кабели, предназначенные для передачи и распределения электрической энергии, т. е. силовые, состоящие из следующих основных конструктивных элементов: токопроводящих жил, изоляции, оболочек и защитных покровов. Кроме основных элементов в конструкцию силовых кабелей могут входить экраны, нулевые жилы, жилы защитного заземления и заполнители. Токопроводящие жилы предназначены для прохождения электрического тока и изготавливаются из меди или алюминия. Алюминиевые жилы сечением до 35 мм^2 включительно изготавливают однопроволочными, от 50 до 240 мм^2 однопроволочными или многопроволочными, а от 300 до 800 мм^2 – многопроволочными. Медные жилы до 16 мм^2 включительно изготавливают однопроволочными; $25 - 95 \text{ мм}^2$ – однопроволочными и многопроволочными; $120 - 800 \text{ мм}^2$ – многопроволочными.

Токопроводящие жилы бывают основными и нулевыми. Основные жилы предназначены для выполнения основной функции кабеля – передачи по ним электроэнергии. Нулевые жилы используются для протекания разности токов фаз при неравномерной их нагрузке. Присоединяются они к нейтрали силового трансформатора.

Измерение сопротивления изоляции кабельных линий (КЛ) рекомендуется производить мегаомметром на напряжение 2500 В. Выполнять измерения разрешается только на отключенных и разряженных КЛ.

Измерения сопротивления изоляции одножильных кабелей без металлического экрана (брони, оболочки), проложенных в земле, производятся между жилой и землей; для одножильных кабелей, проложенных на воздухе, сопротивление изоляции не измеряется.

Измерение изоляции одножильных кабелей с металлическим экраном (оболочкой, броней) производится между жилой и экраном. Измерение изоляции многожильных кабелей без металлического экрана (брони, оболочки) производится между каждой жилой и остальными жилами, соединенными между собой.

Измерение изоляции многожильных кабелей с металлическим экраном (броней, оболочкой) производится между каждой жилой и остальными жилами, соединенными вместе и с металлическим экраном (броней, оболочкой), например для трехжильного кабеля, с обозначением жил **A**, **B** и **C**, по следующей схеме:

$- A - B + C$ +оболочка; $- B - C + A$ +оболочка; $- C + B - A$ +оболочка (знак + означает, что жила используется в опыте, а знак – что жила остается свободной).

Электрическая схема измерения сопротивления изоляции кабеля с металлической броней приведена на рис 2.1.

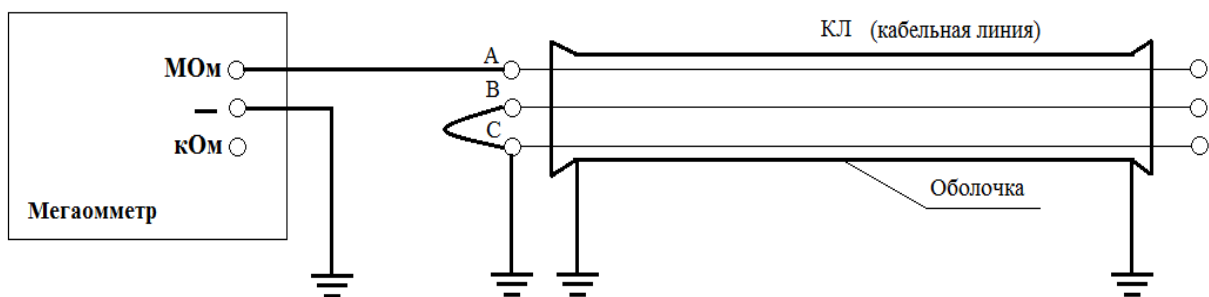



Рис. 2.1. Схема электрических соединений для измерения сопротивления изоляции жил силового кабеля мегаомметром типа М4100/5

Измерение токов, напряжений и мощности при выполнении лабораторной работы осуществляется амперметрами, ваттметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в таблице 2.1. В качестве источника испытательного напряжения используется генератор мегаомметра типа М4100/5.

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

Таблица 2.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	электромагнитная	0÷250 В	1
3	Амперметр	электромагнитная	0÷300 А	2
4	Киловаттметр	электромагнитная	0÷100 кВт	1
5	Ваттметр	электродинамическая	0 – 3000 Вт	1
6	Мегаомметр М4100/5	Индукционная с выпрямителем и измерительным механизмом	0 – 1000 Мом Выходное напряжение 2500 В	1

2. Подготовка к работе.

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями, рекомендованной литературой [1, с. 6 – 44], [3], [4] порядком работы и мерами безопасности при измерении сопротивлений мегаомметром М4100/5.

2.2. В соответствии со схемой электрических соединений для измерения сопротивления изоляции жил силового кабеля мегаомметром М4100/5, показанной на рис. 2.1, составить электромонтажную схему опыта.

2.3. Изучить схему замещения изоляции силового кабеля и объяснить влияние токов утечки и токов абсорбции на качественные характеристики изоляции.

2.4. Изучить методику экспериментального определения сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь, емкости изоляции силовых кабелей.

2.5. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий раздела 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

3. Рабочее задание

3.1. Проверить наличие остаточного заряда кабельной линии перед началом первого и последующих опытов. Для этого КЛ разряжается путем соединения всех металлических элементов между собой и землей не менее чем на 2 минуты.

3.2. Собрать электромонтажную схему модели установки для измерения сопротивления изоляции жил силового кабеля мегаомметром М4100/5, (рис. 2.1,) и после проверки схемы преподавателем вращением рукоятки генератора (встроен в корпус мегаомметра) с номинальной скоростью провести отсчет по соответствующей шкале мегаомметра значения сопротивлений изоляции, измеренном через 15 и 60 секунд после приложения напряжения. Результаты измерений занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Время измерения, с	Измеренное сопротивление изоляции «провод – оболочка»			Измеренное сопротивление изоляции «провод – провод»			Коэффициент абсорбции $K_{абс}$
	R_{AO}	R_{BO}	R_{CO}	R_{AB}	R_{BC}	R_{CA}	
15							
60							

3.3. По результатам опыта пункта 3.2 оценить состояние изоляции по значению коэффициента абсорбции с учетом значений сопротивления изоляции, измеренной через 15 и 60 секунд после приложения напряжения.

3.4. Выполнить измерение сопротивления фазной $R_{iэ}$ (фазный провод – экран) и междуфазной R_{ij} (фаза – фаза) изоляции, а также емкости кабеля, соответственно $C_{iэ}$ и C_{ij} цифровым измерительным мостом типа Е7-4. Результаты измерений занести в табл. 2.3.

3.5. Выполнить измерение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции силового кабеля цифровым измерительным мостом типа Е7-4

при подключении исследуемого образца по четырехпроводной схеме. Результаты измерений занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Измеренные значения сопротивлений фазной R_{i3} и междуфазной R_{ij} изоляции				Экран	tg δ	Измеренные значения емкости кабеля: – фазной C_{i3} и междуфазной C_{ij} , соответственно			
Фазы			Экран			Фазы			Экран
	L_1	L_2		L_3		L_1	L_2	L_3	
L_1						L_1			
L_2						L_2			
L_3						L_3			
	Экран					Экран			

4. Методические указания

По значениям сопротивлений изоляции, измеренной через 15 и 60 секунд после приложения напряжения, делают вывод о пригодности кабельной линии к эксплуатации. Кабельная линия напряжением до 1 кВ считается выдержавшей испытания, если сопротивление изоляции составляет не ниже 0,5 МОм.

Упомянутый временной интервал объясняется тем, что при проведении измерений следует учитывать влияние температуры и влажности на значение сопротивления изоляции кабельной линии. При повышении температуры в большинстве диэлектриков, используемых в качестве электрической изоляции, увеличивается количество свободных носителей зарядов, что приводит к снижению сопротивления. Однако однозначно сделать вывод о состоянии качества изоляции только по температурному фактору весьма затруднительно, поэтому необходимо также учитывать влажность изоляции, поскольку большинство используемых электроизоляционных материалов являются гигроскопичными, что вносит дополнительную погрешность в значение сопротивления изоляции, поскольку при этом происходит существенное уменьшение сопротивления изоляции. На практике для оценки состояния изоляции целесообразно использовать коэффициент абсорбции, выражаемый через сопротивления изоляции 15-ти и 60 секундный интервалы измерения

$$K_{\text{абс}} = R_{60}^{**} / R_{15}^{*} \quad (2.1)$$

где R_{15}^{*} и R_{60}^{**} - значения сопротивления изоляции, измеренные соответственно через 15 и 60 секунд после приложения напряжения. Значение коэффициента абсорбции $K_{\text{абс}}$ для влажной изоляции находится в пределах 1,0 – 1,2, для сухой изоляции – 1,2 -1,7 и выше.

Для измерения сопротивления изоляции оборудования в сетях 0,4 кВ используются мегаомметры с выходным напряжением не менее 1000 В, а в сетях 6 кВ и выше - мегаомметры с выходным напряжением 2500 В. В связи с процессом поляризации, протекающем в изоляции, значение измеряемого сопротивления зависит от времени приложения напряжения примерное значение которого можно определить рассматривая схему замещения изоляции (рис.2.2).

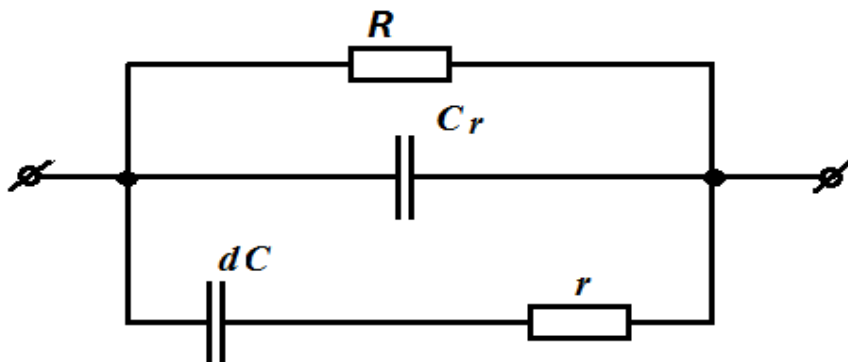


Рис. 2.2 - Схема замещения изоляции оборудования

Сопротивление R в схеме замещения рис.2.2 обусловлено протеканием в изоляции тока утечки, а ёмкость C_r – эквивалентна электрической ёмкости оборудования, которое подвергается испытанию (трансформатор, электродвигатель и т. д.), значение этой ёмкости находится в пределах от нескольких сотен до нескольких тысяч пикофарад. В связи с этим такая ёмкость полностью зарядится за время ограниченное 15 секундами (R_{15}^{*}). Силовые кабели обладают значительной электрической ёмкостью (1 – 2 микрофарады на фазу), поэтому их рекомендуется отключать от испытываемого оборудования с целью уменьшения погрешности (примерно на значение коэффициента абсорбции).

Последовательная цепочка dC и r эквивалентна полному сопротивлению цепи в результате протекания абсорбционных токов. При использовании для изоляции качественных диэлектриков, не содержащих примесей

и влаги, для заряда емкости потребуется значительно больший промежуток времени. На практике это время ограничивают 60 секундами (R_{60}^{**}).

В процессе измерения может быть установлена асимметрия значений сопротивлений, причиной которой явится увлажнение и загрязнение концевых муфт КЛ. Для её устранения используется пропитка. Значение сопротивления изоляции КЛ напряжением выше 1 кВ не нормируется.

4.1. Схемы и средства измерений сопротивления изоляции

Сопротивление изоляции кабельных линий, как и любого электрооборудования, определяется протекающим током при приложении напряжения постоянного тока. При напряжениях до нескольких киловольт для этих целей применяются мегаомметры. При более высоких напряжениях используются специализированные источники выпрямленного напряжения, при условии измерения тока проводимости и проводимости изоляции.

В данной лабораторной работе для измерения сопротивления изоляции силового кабеля используется мегаомметр типа М4100/5, схема электрическая принципиальная приведена на рис. 2.3. Схема состоит из генератора переменного тока G , выпрямителя с умножением напряжения, измерительного механизма (логометр магнитоэлектрической системы) ИП и добавочных резисторов. Диапазоны измерения изменяются при помощи специальной переключки находящейся на одном из соединительных проводов. При измерении сопротивления изоляции в диапазоне *мегаом* измеряемое сопротивление подключается к зажимам «МОм» и «-». При измерении сопротивления изоляции в диапазоне *килоом* измеряемое сопротивление подключается между закороченными зажимами «МОм», «-» и зажимом «кОм».

Перед началом измерений на время подключения мегаомметра к испытываемой цепи последняя должна быть временно заземлена. Опасно прикасаться к соединительным проводам и токоведущим элементам испытываемой цепи в процессе измерений.

Перед началом работы необходимо проверить исправность мегаомметра в следующем порядке:

- извлечь мегаомметр из футляра и установить рукоятку генератора в рабочее положение;

- при вращении рукоятки генератора с номинальной скоростью (120 оборотов в минуту) стрелка измерительного прибора должна установиться на отметке «бесконечность» шкалы «МОм»;

- установить переключку между зажимами «МОм» и «←», затем, вращая рукоятку генератора с номинальной скоростью убедиться, что стрелка измерительного прибора должна установиться на отметке «0» шкалы «МОм»;

- убедившись в исправности мегаомметра, приступайте к измерению сопротивления изоляции. Для этого присоедините испытываемую цепь к соответствующим зажимам и, вращая рукоятку генератора с номинальной скоростью (120 оборотов в минуту), произведите отсчет по соответствующей шкале.

Результат измерения сопротивления изоляции мегаомметром М41001/5 может быть искажен поверхностными токами утечки объекта. Для уменьшения искажения результата измерений, на изоляцию испытываемой цепи накладываются токоотводящий электрод, который присоединяется к зажиму «Э».

Технические характеристики мегаомметра М4100/5 приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

1	Диапазон измерений	кОм – 0 – 20000	МОм – 0 – 1000
2	Выходное напряжение на диапазоне измерений «МОм», В	2500 ± 250	
3	Основная погрешность %, не более	±1 от длины шкалы	
4	Класс точности	1,0	
5	Длина шкалы мм, не менее	80	
6	Питание мегаомметра	Встроенный генератор, приводимый во вращение от руки	
7	Номинальная скорость вращения рукоятки генератора, об/мин.	120	
8	Масса мегаомметра, кг, не более	4,9 (с футляром)	
9	Время установления рабочего режима	Непосредственно после достижения номинальной скорости вращения рукоятки генератора	
10	Температурный диапазон	От минус 30 до плюс 40 °С	
11	Относительная влажность при плюс 30 °С	До 90 %	

4.2. Схемы включения мегаомметра

Обычно используются две схемы включения мегаомметра – прямая и перевернутая: соответственно заземляются выводы "Э" или "-". Наиболее часто применяется перевернутая схема включения. Экранирование объекта измерения применяется в случаях, когда необходимо исключить влияние поверхности изоляционной конструкции или ограничить область контролируемой изоляции. Для исключения влияния состояния поверхности на наружной части изоляционной конструкции около электрода, соединенного с выводом " r_x " мегаомметра, устанавливается экранирующее кольцо из мягкого провода, соединяемое с выводом "Э". Для ограничения контролируемой области изоляции потенциал экрана мегаомметра подается на соответствующий электрод (рис. 2.4).

Сопротивление, включенное между выводами "Э" и " r_x " (см. рис.2.3) в схемах с экранированием шунтирует измерительный элемент мегаомметра, чем может внести недопустимую погрешность в измерения. Наименьшее допустимое значение этого сопротивления нормируется; оно не должно быть меньше 1% конечного (наибольшего) значения шкалы на данном пределе измерений. Желательно чтобы сопротивление цепей экранирования в 50-100 раз было больше, чем сопротивление измерительного элемента мегаомметра.

4.3. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь и емкости изоляции

На значение допустимого тока нагрузки в силовых кабелях, особенно с бумажной пропитанной изоляцией, существенное влияние оказывают диэлектрические потери, которые возрастают при увеличении уровня напряжения. При напряжении 220 кВ величина этих потерь может достигать 50% потерь в токопроводящих жилах.

Под диэлектрическими потерями понимают электрическую мощность, рассеиваемую в изоляции в единицу времени под действием приложенного напряжения и вызывающую нагрев изоляции. Диэлектрические потери в изоляции одной фазы участка кабеля можно определить по значению электрической емкости C и заданном уровне переменного напряжения U с частотой $\omega = 2\pi f$ по формуле

$$P = U^2 \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta, \text{ Вт/м} \quad (3.1)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь равный отношению активного и реактивного токов в изоляции в соответствии с соотношением (3.2) (величина обратная $\operatorname{tg} \delta$ называется добротностью изоляции Q).

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_p. \quad (3.2)$$

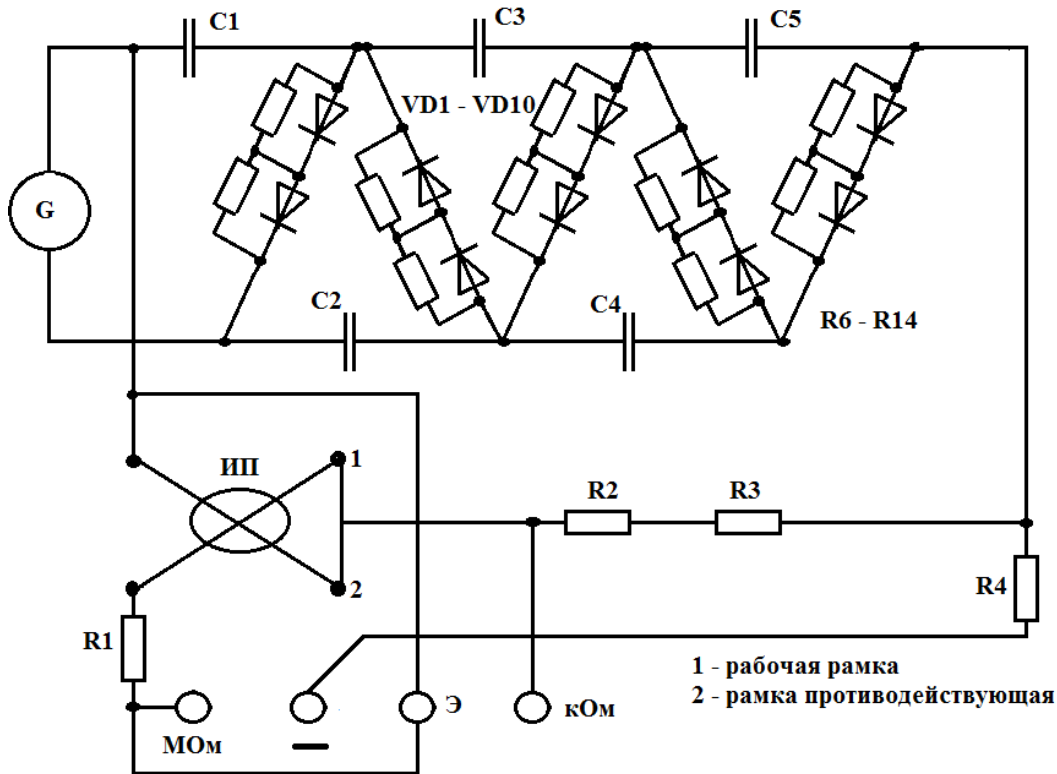


Рис. 2.3. Схема электрическая принципиальная мегаомметра М4100/5

Диэлектрические потери существенно зависят от температуры изоляции и при её повышении возрастают вследствие увеличения тока проводимости и тока абсорбции. В случае однородной изоляции в кривой зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от температуры $\operatorname{tg} \delta = f(T)$ наблюдается максимум вследствие дипольной поляризации. Если изоляционные материалы состоят из двух или большего количества дипольных веществ, в этой зависимости наблюдается несколько максимумов. У гигроскопичных материалов значение $\operatorname{tg} \delta$ заметно возрастает при увеличении влажности. Повышение напряжения также сопровождается увеличением значения $\operatorname{tg} \delta$, что обусловлено процессом ионизации газовых включений в

изоляции. Значение диэлектрических потерь зависит также от времени нахождения кабеля под напряжением. По количественному изменению значения $\text{tg}\delta$ можно сделать вывод о качестве изоляции данной марки силового кабеля.

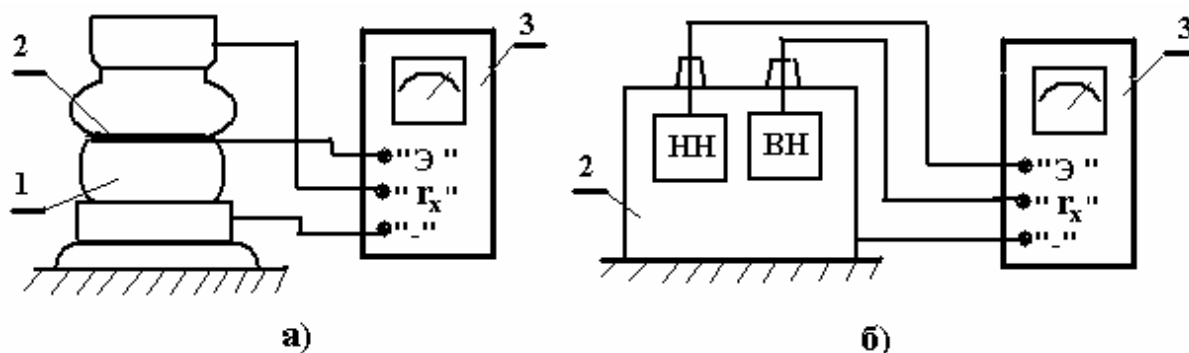


Рис. 2.4 - Экранирование при измерении сопротивления изоляции: а- исключение влияния поверхности изоляции; б - исключение влияния изоляции обмотки НН трансформатора; 1 - объект; 2 - экранное кольцо (бандаж); 3 – мегаомметр.

Удельные диэлектрические потери в изоляции силового кабеля ($\text{Вт}/\text{м}^3$) определяются в соответствии с формулой

$$p = E^2 \omega \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \text{tg}\delta, \quad (3.3)$$

где E – напряженность электрического поля ($\text{В}/\text{м}$);

ϵ_0 - электрическая постоянная ($\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}/\text{м}$);

$\epsilon_r \text{tg}\delta$ - коэффициент диэлектрических потерь;

ϵ_r - диэлектрическая проницаемость.

Градирование изоляции позволяет снизить напряженности у жилы кабеля или уменьшить толщину изоляции, осуществив более равномерное распределение напряженности по толщине изоляции. Градирование изоляции в кабелях выполняется при помощи бумаги различной плотности и толщины. Более тонкая и плотная бумага имеет большую диэлектрическую проницаемость и электрическую прочность и наматывается слоями, ближайшими к жиле. Последующие слои выполняются из более дешёвой имеющей меньшую диэлектрическую прочность бумаги. Применение трёхслойного градирования позволяет уменьшить толщину изоляции маслонаполненного кабеля на напряжение 110 кВ с 16,8 до 12,6 мм.

Электрическая ёмкость одной фазы силового кабеля C на единицу длины в фарадах на метр (Ф/м) для круглых токопроводящих жил и неградирированной изоляции определяется по формуле

$$C = \frac{10^{-9} \varepsilon_r}{18 \ln(D/d_{\text{ж}})} \quad (3.4)$$

где D – диаметр кабеля по фазной изоляции; $d_{\text{ж}}$ – диаметр токоведущей жилы кабеля.

Для градирированной изоляции значение электрической ёмкости кабеля определяется по формуле

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_i} \cdot \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad (3.5)$$

Ёмкость трёхжильного силового кабеля с секторными жилами можно определить приближенно по приведенным формулам с заменой секторных жил на круглые, но с сечением, увеличенным на 50% при той же толщине изоляции.

Значения диэлектрической проницаемости ε_r и тангенса угла диэлектрических потерь в изоляции $\text{tg} \delta$ при максимально допустимых температурах и максимально возможных для каждого типа кабеля напряжениях приведены в табл. 2.5.

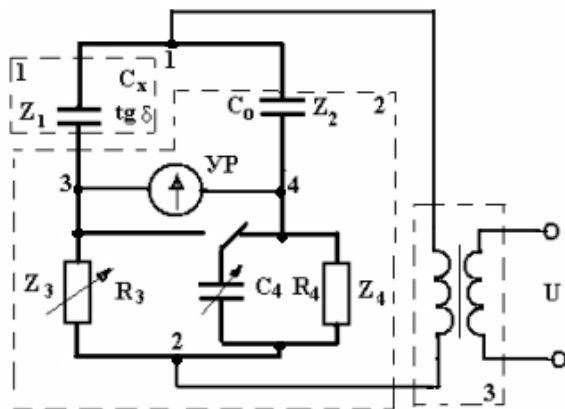
Таблица 2.5

Тип кабеля	$\text{tg} \delta$	ε_r
Кабели с пропитанной бумажной изоляцией		
С вязкой пропиткой, с полностью или предварительно пропитанной изоляцией или пропитанные нестекающей массой	0,01	4
Маслонаполненные низкого давления	0,004 – 0,0045	3,3 – 3,75
Маслонаполненные высокого давления в стальном трубопроводе	0,0045	3,7
газонаполненные	0,004 – 0,0045	3,4 – 3,5
Кабели с изоляцией из других материалов		
Из резины на основе бутилкаучука	0,05	4,5
Из этилпропиленовой резины	0,04	3
Из поливинилхлорида	0,1	8
Из сшитого полиэтилена	0,0008	2,5
Из термопластичного полиэтилена	0,001	2,3

4.4. Схемы и средства измерений тангенса угла диэлектрических потерь и емкости изоляции

Для эксплуатационного контроля тангенса угла диэлектрических потерь и емкости изоляции применяется схема измерений с мостом Шеринга. Мостовая схема измерений (рис.2.5) состоит из контролируемого объекта с параметрами C_x и $\text{tg} \delta$ (плечо Z_1), образцового конденсатора C_0 (плечо Z_2), цепей уравнивания (плечи Z_3 , Z_4) и указателя равновесия (УР). Измерительным элементом схемы (первичным преобразователем), через который протекает ток объекта, является плечо Z_3 (резистор R_3). Мост может использоваться при прямой, перевернутой и обратной схемах включения. При прямой схеме заземляется точка 2 моста; при перевернутой схеме — точка 1, а при обратной — точка 3. Обратная схема включения иногда называется схемой с заземленной диагональю.

Процесс измерения заключается в уравнивании мостовой схемы, для чего поочередными изменениями сопротивления резистора R_3 и емкости конденсатора C_4 производят выравнивание напряжений плеч Z_3 и Z_4 моста. При равновесии моста, что устанавливается по отсутствию показаний указателя равновесия, выполняется равенство $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$, исходя из которого, определяются параметры изоляции контролируемого объекта:



$$\text{tg} \delta = C_4 R_4 \quad \text{и} \quad C_x = \frac{R_4}{R_3} C_0.$$

Рис.2.5. Мостовая схема измерений: 1 – объект контроля; 2 – средство измерений (измерительный мост); 3 – источник напряжения.

При наличии помех (тока влияний) возможны случаи, когда ток образцового конденсатора отстает по фазе от тока, протекающего по плечу Z_3 моста и являющегося суммой тока объекта и тока помех. При этом для измерения так называемого отрицательного значения $\text{tg} \delta$ конденсатор C_4 следует включать параллельно резистору R_3 ; значение $\text{tg} \delta$ рассчитывается по формуле $\text{tg} \delta(-) = -\omega C_4 R_4$.

Серийно выпускаемые измерительный мост типа Р5026 и образцовый конденсатор Р5023 обеспечивают возможность измерений при высоком напряжении до 10 кВ (три диапазона измерений емкости — А1, А2 и А3) и при низком напряжении (50 В от встроенного трансформатора, диапазоны А4 и А5). Упрощенная схема моста в диапазонах измерений на высоком напряжении приведена на рис.2.6,а,б. Все элементы схемы помещены внутри экрана ("Э"), изолированного от заземляемого корпуса на рабочее напряжение моста 10 кВ (для проведения измерений при перевернутой схеме включения). Основные характеристики моста Р5026 и формулы для расчёта результатов измерений приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6.

Пределы измерения		Пределы рабочего напряжения, кВ	Положение переключателя		Формулы расчета		I_{C_x} , max, А
C_x	$\text{tg}\delta$		А	Н	C_x , мкФ	$\text{tg}\delta$	
10 - 1000	$10^{-4} - 0,1$	5 - 10	1	0,1	$0,1C_0 R_4/R_3$	$0,1C_4$	$3 \cdot 10^{-3}$
100 - 10000	$10^{-4} - 1,0$	3 - 10	1	1	$C_0 R_4/R_3$	C_4	$3 \cdot 10^{-2}$
$10^4 - 10^5$			2	1	$200C_0 \frac{150 - S + R_3}{R_3}$	C_4	$3 \cdot 10^{-1}$
$10^5 - 10^6$	$5 \cdot 10^{-4} - 1,0$	3 - 5	3	1	$2000C_0 \frac{150 - S + R_3}{R_3}$	C_4	3
$650 - 2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-3} - 0,1$	< 0,1	4	0,1	$4 \cdot 10^{-4} \cdot R_4/R_3$	$0,1C_4$	$4 \cdot 10^{-3}$
$6500 - 2 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^{-3} - 1,0$		4	1	$4 \cdot 10^{-3} \cdot R_4/R_3$	C_4	$3 \cdot 10^{-2}$
$2 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^8$			5	1	R_4/R_3		$2 \cdot 10^{-1}$

Примечание к табл. 2.6: - C_0 - ёмкость образцового конденсатора Р5023, пФ; - C_4 - отсчет ёмкости магазина емкостей плеча Z_4 моста, мкФ; - R_3 - отсчет сопротивления магазина сопротивлений плеча Z_3 моста, Ом. - на пределе А1 значение $\text{tg}\delta(-) = -\text{tg}\delta \cdot R_3/R_4$; - на пределах А2 и А3 значение $\text{tg}\delta(-) = -\text{tg}\delta \cdot R_3/R_4 \cdot \frac{150}{150+R_3}$;

При измерениях следует выбирать такой шунт (диапазон емкостей), при котором уравнивание производится не менее чем тремя декадами резистора R_3 . Диапазон измеряемых отрицательных значений $\text{tg}\delta$ при включенном шунте (диапазоны емкости А2 и А3) значительно уже, чем при измерениях без шунта. Поэтому при измерениях в условиях интенсивных влияний, когда возможно отрицательное значение $\text{tg}\delta$, мост Р5026 следует использовать в диапазоне А1.

5. Порядок оформления отчета.

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему или эскиз макета установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения и выводы, а также ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы

1. В каком случае в силовых кабелях не производят замера сопротивления изоляции?
2. Что характеризует коэффициент абсорбции и каковы пределы его изменения?
3. Объясните, как необходимо проводить измерения сопротивления изоляции с повышенной точностью?
4. Перечислите марки приборов, используемых для измерения сопротивления изоляции.
5. Укажите факторы, оказывающие влияние на величину измеряемого сопротивления изоляции.
6. Приведите электрическую схему замещения изоляции силового кабеля и дайте характеристики каждого её элемента.
7. Укажите способы уменьшения погрешности измерения электрических свойств изоляции.
8. Перечислите параметры, с помощью которых можно оценить диэлектрические потери в изоляции силового кабеля.
9. Приведите эквивалентные схемы замещения, которые используются для изучения диэлектриков с потерями.
10. Какие физические процессы вызывают диэлектрические потери в изоляции?
11. Перечислите внешние факторы, оказывающие влияние на количественное значение диэлектрических потерь.
12. С какой целью определяется электрическая емкость токопроводящей жилы силового кабеля?
13. Укажите диапазон изменения относительной диэлектрической проницаемости диэлектрических материалов, используемых в качестве изоляции силовых кабелей.
14. В чем отличие схем измерения тангенса угла диэлектрических потерь на высоком и низком напряжениях?

15. Перечислите и кратко характеризуйте приборы и оборудование, которые используются для измерения $\text{tg}\delta$ изоляции силового оборудования.

16. Перечислите основные факторы, оказывающие влияние на погрешность измерения $\text{tg}\delta$ изоляции.

17. Перечислите материалы, применяемые для изоляции в силовых кабелях, и укажите примерные значения тангенса угла диэлектрических потерь.

18. В чем отличие градированной изоляции силового кабеля от неградированной?

19. Поясните зависимость электрической емкости силового кабеля от материала и технологии изготовления изоляции.

20. Поясните зависимость напряженности электрического поля силового кабеля в изоляции в зависимости от ее диэлектрических свойств.

21. Почему с увеличением температуры возможно резкое увеличение угла диэлектрических потерь в изоляции?

Лабораторная работа № 3

Моделирование воздушных линий электропередачи распределительных сетей

Цель работы: В работе ставится цель – формирование у специалистов - энергетиков знаний в области передачи электрической энергии путем исследования процессов на моделях воздушных линий электропередачи населенных пунктов. В результате проведения работы студенты должны знать методы построения схем замещения воздушных линий электропередачи и методы расчёта их режимов; уметь использовать: базовые знания по теоретическим основам электротехники при решении вопросов получения, преобразования, передачи и распределения электрической энергии: математические модели для анализа режимов электроэнергетических систем; правила устройства электрических установок при проектировании системных объектов; приобрести навыки составления расчётных схем и их схем замещения с учетом параметров кабельных и воздушных линий; формулирования и постановки задач **расчёта** параметров установившихся режимов простейших электрических сетей; использования вычислительной техники для решения сетевых задач.

1. Объект и средства исследования.

Объектом исследования служат процессы в моделях воздушных линий электропередачи протяженностью менее 300 – 350 км.

Измерение токов, напряжений и мощности при выполнении лабораторной работы осуществляется амперметрами, ваттметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	электромагнитная	0÷250 В	1
3	Амперметр	электромагнитная	0÷300 А	2
4	Киловаттметр	электромагнитная	0÷100 кВт	1
5	Ваттметр	электродинамическая	0 – 3000 Вт	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

2. Подготовка к работе.

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 6 – 44], [2, с. 52 – 93].

2.2. Определить в соответствии с вариантом задания параметры схемы замещения воздушной линии электропередачи напряжением 10 кВ и их допустимые мощности по данным табл. 3.2.

Таблица 3.2

№ варианта	Марка провода	Удельное активное сопротивление, Ом · мм ² /км;	Погонное индуктивное сопротивление, Ом/км	Емкостная проводимость линии, См/км	Длина линии, км	наружный диаметр провода, мм	Предельно допустимая сила тока нагрузки, А
1	АС 35	0,7897	0,403	-	5	8,4	175
2	А 35	0,8502	0,392	-	10	9,6	170
3	АС 50/8	0,60298	0,390	-	15	9,6	210
4	АС 70/11	0,42859	0,382	-	20	11,4	265
5	АС 70/72	0,4276	0,366	-	25	15,4	265
6	А 50	0,5880	0,355	-	30	9,0	215
7	А 70	0,4204	0,341	-	40	10,7	265
8	АС 95/16	0,30599	0,397	2,87	50	13,5	330
9	АС 120/19	0,24917	0,391	2,92	75	15,2	390
10	АС 150/19	0,19919	0,384	2,97	100	16,8	450

2.3. Составить электрическую принципиальную схему замещения исследуемой ЛЭП для проведения опыта на напряжении 220 В с учетом необходимых измерительных приборов. Вычислить масштабные коэффициенты для пересчета данных на номинальное напряжение линии.

2.4. По значению предельно допустимой силы тока нагрузки при напряжении 10 кВ вычислить активное сопротивление нагрузки и пересчитать это значение на напряжение 220 В.

2.5. Разработать электромонтажную схему для проведения опыта холостого хода линии и под нагрузкой по п. 2.3 с учетом п. 2.4 при значении

питающего напряжения 220 В и составить таблицу для записи результатов измерений (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Режим работы ЛЭП	Холостой ход линии					Линия электропередачи под нагрузкой				
Измеряемый параметр	$U_{вх}$ В	$I_{вх}$ А	$U_{вых}$ В	$I_{вых}$ А	P Вт	$U_{вх}$ В	$I_{вх}$ А	$U_{вых}$ В	$I_{вых}$ А	P Вт
Номер опыта										
1										
2										
...										
5										

2.6. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий раздела 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

3. Рабочее задание

3.1. Собрать электромонтажную схему по п. 2.4 и после проверки схемы преподавателем включить напряжение питания стенда и автотрансформатора. Выставить на зажимах автотрансформатора напряжение 220 В.

3.2. Провести эксперимент по п. 2.5 при значении питающего напряжения 220 В для опытов холостого хода и нагрузки. Повторить опыты при значении питающего напряжения 200 В, 210 В, 230 В, 240 В. Результаты измерений записать в табл. 3.3.

3.3. По результатам экспериментов п. 3.2 рассчитать потери активной мощности в линии в предельных режимах электропередачи и построить график зависимости этих потерь от значения напряжения питания пересчитанного к 10 кВ..

4. Методические указания

4.1. Схемы замещения воздушных линий электропередачи и их параметры.

В общем случае линии электропередачи рассматриваются как линии с равномерно распределенными по её длине параметрами. В инженерных

расчетах для воздушных линий электропередачи (ЛЭП) длиной менее 300 – 350 км обычно используют упрощенные Т- и П-образные схемы замещения с сосредоточенными параметрами. При этом погрешности электрического расчета линии практически зависят только от её длины. Выбор схемы замещения линии электропередачи определяется сложностью системы электроснабжения. При расчетах сложных систем электроснабжения на ЭВМ целесообразно использовать П-образную схему замещения с целью упрощения расчетов. Схемы замещения ЛЭП с сосредоточенными параметрами приведены на рис. 3.1.

В схемах замещения выделяют продольные элементы – сопротивления линии электропередачи: $\underline{Z} = R + jX$ и поперечные элементы – проводимости: $\underline{Y} = G + jB$. Значения указанных параметров для ЛЭП определяются по общему выражению $\Pi = \Pi_0 L$, где $\Pi_0 \{R_0, X_0, g_0, b_0\}$ - значение продольного или поперечного параметра, отнесенного к 1 км линии; L - протяженность линии электропередачи (погонные параметры).

В частных случаях, в зависимости от исполнения ЛЭП и класса напряжения, используют только доминирующие (наиболее характерные) параметры, в зависимости от их физического проявления.

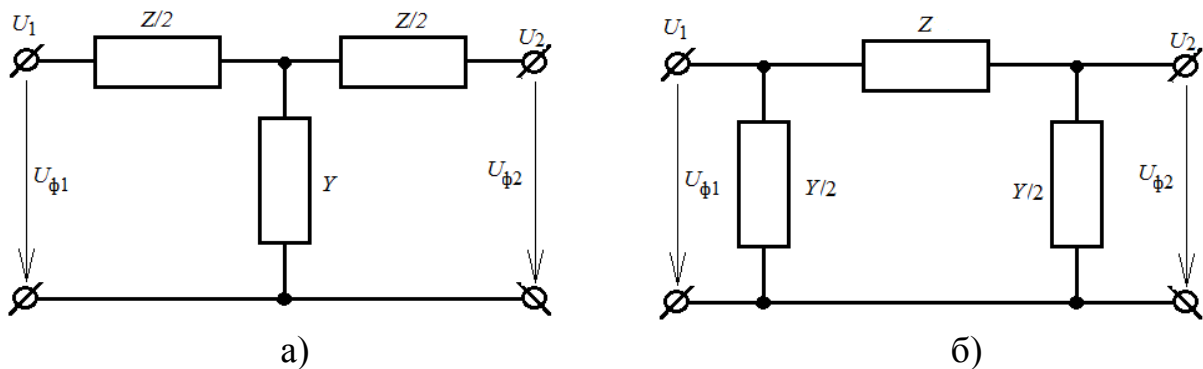


Рис. 3.1. Схемы замещения ЛЭП с сосредоточенными параметрами - Т – образная (а) и П – образная (б)

Активное сопротивление обуславливает тепловые потери и зависит от материала токоведущих проводников и их сечения. Для ЛЭП с проводами небольшого сечения из цветных металлов активное сопротивление принимают равным омическому, поскольку погрешности от неучета поверхностного эффекта на промышленной частоте в этом случае не превышают 1 %. Для ЛЭП с сечением проводов более 500 мм^2 явление поверхностного эффекта на промышленной частоте значительно.

Километрическое или погонное активное сопротивление (Ом/км) определяется по формуле

$$R_0 = \rho / S, \quad (3.1)$$

где ρ - удельное активное сопротивление металла провода, Ом · мм²/км. Для технического алюминия в зависимости от его марки можно принять $\rho = 29,5 \div 31,5$ Ом · мм²/км, для меди $\rho = 18,0 \div 19,0$ Ом · мм²/км; S – сечение фазного провода (жилы), мм².

Необходимо помнить, что активное сопротивление зависит также от температуры провода, которая определяется температурой окружающей среды, скоростью ветра и значением протекающего по проводу силы тока. Зависимость активного сопротивления от температуры провода t определяется соотношением

$$R_0^t = R_0^{20} [1 + \alpha(t - 20^\circ\text{C})], \quad (3.2)$$

где R_0^{20} - нормативное значение сопротивления R_0 рассчитывается по соотношению (3.1) при температуре проводника $t = 20^\circ\text{C}$; α - температурный коэффициент электрического сопротивления, 1/град (для медных, алюминиевых и сталеалюминиевых проводов $\alpha = 0,00403$, для стальных – $\alpha = 0,00455$).

Индуктивное сопротивление проводника X обусловлено магнитным полем, возникающим внутри и вокруг проводника при протекании по нему переменного тока. В проводнике наводится ЭДС самоиндукции

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt},$$

направленная в соответствии с принципом Ленца, противоположно ЭДС источника. Индуктивное сопротивление X зависит от частоты тока $\omega = 2\pi f$ и индуктивности фазы L

$$X = 2\pi fL = \omega L.$$

Индуктивное сопротивление фаз многофазных ЛЭП зависит также от взаимного расположения фазных проводов (жил). Кроме ЭДС самоиндукции в каждой фазе наводится противодействующая ей ЭДС взаимоиндукции, значение которой в каждой фазе зависит от конструкции ЛЭП. Например, при расположении фаз по вершинам равностороннего треугольника результирующая противодействующая ЭДС во всех фазах одинакова и одинаковы пропорциональные ей индуктивные сопротивления фаз. При горизонтальном расположении фазных проводов потокосцепление фаз неодинаково, поэтому индуктивные сопротивления фазных проводов раз-

личны. Для достижения симметрии (одинаковости) параметров фаз ЛЭП высоких напряжений (500 кВ и выше) на специальных опорах выполняют транспозицию (перестановку) фазных проводов.

Индуктивное сопротивление, Ом/км, отнесенное к 1 км линии, на частоте тока 50 Гц и $\omega = 2\pi f = 314$ рад/с проводов из цветных металлов ($\mu = 1$) определяется по эмпирической формуле как сумма внешнего \dot{X}_0 и внутреннего \ddot{X}_0 индуктивных сопротивлений. Внешнее индуктивное сопротивление определяется внешним магнитным потоком, образованным вокруг проводов и значениями величин D_{cp} и r_{np} . Внутреннее индуктивное сопротивление определяется внутренним потоком, замыкающимся в проводах.

$$X_0 = \dot{X}_0 + \ddot{X}_0 = \omega \cdot \left(0,46 \cdot \lg \frac{D_{cp}}{r_{np}} + 0,05\mu \right) \cdot 10^{-3}, \quad (3.3)$$

где $D_{cp} = \sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}}$ - среднегеометрическое расстояние между фазными проводами (жилами), м; $r_{np} = (1,15 \div 1,2) \sqrt{\frac{S+S_{ст}}{\pi}}$ - радиус многопроволочных проводов, м; $S_{ст}$ - сечение стальной части провода; S - суммарная площадь сечения токоведущей части многопроволочного провода; μ - магнитная проницаемость материала, Гн/м.

При сближении фазных проводов влияние ЭДС взаимной индукции возрастает, что приводит к уменьшению индуктивного сопротивления ЛЭП. Особенно заметно снижение индуктивного сопротивления (в 3 – 5 раз) в кабельных линиях. Разработаны компактные воздушные линии высокого и сверхвысокого напряжения повышенной пропускной способности со сближенными фазами с использованием эффекта взаимного влияния цепей и сниженным на 25 – 30 % индуктивным сопротивлением.

Из изложенного выше следует, что активное сопротивление линии электропередачи зависит от материала, сечения и температуры провода. Зависимость $R_0 = f(S)$ обратно пропорциональна сечению провода, ярко выражена при малых сечениях, когда R_0 имеет большие значения, и мало заметна при больших сечениях проводов. Индуктивное сопротивление ЛЭП определяется исполнением линии, конструкцией фазы и практически не зависит от сечения проводов (значение $\lg \frac{D_{cp}}{r_{np}} \approx \text{const}$).

Емкостная проводимость обусловлена емкостями между фазами, фазными проводами (жилами) и землей. В практических расчетах рабочую

емкость трехфазной воздушной линии (ВЛ) с одним проводом в фазе на единицу длины, Ф/км, определяют по формуле

$$C_0 = 0,024 \cdot \left(\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} \right)^{-1} \cdot 10^{-6}. \quad (3.4)$$

Аналогично определяется емкостная проводимость воздушной линии электропередачи, См/км

$$b_0 = \omega C_0 = 7,78 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} \right)^{-1}. \quad (3.5)$$

Под действием приложенного напряжения через емкости линий электропередачи протекают емкостные (зарядные) токи. Расчетное значение емкостной силы тока на единицу длины, кА/км

$$I_{c0} = U_{\phi} b_0 = U b_0 / \sqrt{3}. \quad (3.6)$$

Зарядная мощность линии электропередачи, обусловленная током I_{c0} , зависит от напряжения в каждой точке линии

$$Q_{c0} = 3U_{\phi} I_{c0} = 3U_{\phi}^2 b_0 = U^2 b_0, \quad (3.7)$$

Значение зарядной мощности для всей ЛЭП определяется через действительные (расчетные) напряжения начала и конца линии, Мвар

$$Q_c = 0,5(U_1^2 + U_2^2)b_0L = 0,5(U_1^2 + U_2^2)B_c, \quad (3.8)$$

Эта мощность приближенно определяется по номинальному напряжению линии

$$Q_c \approx B_c U_{\text{ном}}^2, \quad (3.9)$$

Где B_c – емкостная проводимость ЛЭП, См; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение ЛЭП, кВ.

ЛЭП с поперечной емкостной проводимостью, потребляющая из сети опережающий напряжение емкостной ток, следует рассматривать как источник реактивной (емкостной) мощности (зарядной мощности). Зарядная мощность уменьшает индуктивную составляющую нагрузки, передаваемую по линии к потребителю. Поэтому в схемах замещения ВЛ, начиная с номинального напряжения 110 кВ., следует учитывать поперечные ветви (шунты) в виде емкостных проводимостей B_c или реактивную мощность Q_c .

Для фаз ЛЭП напряжением 35 – 220 кВ выполненных одиночными проводами индуктивное сопротивление изменяется в узких пределах: $X_0 = (0,4 \div 0,44)$ Ом/км, а емкостная проводимость находится в пределах $b_0 = (2,6 \div 2,8)10^{-6}$ См/км.

Среднее значение зарядной мощности на 100 км для ВЛ напряжением 110 кВ составляет около 3,5 Мвар, для ВЛ 220 кВ – 13,5 Мвар, для ВЛ 500 кВ – 95 Мвар.

Активная проводимость обусловлена потерями активной мощности ΔP_k из-за несовершенства изоляции (утечки по поверхности изоляторов, токов проводимости в материале изолятора) и ионизации воздуха вокруг проводника вследствие коронного разряда. Удельная проводимость определяется по общей формуле для шунта, См/км

$$g_0 = \Delta P_k \cdot 10^{-3} / U_{\text{НОМ}}^2, \quad (3.10)$$

Доминирующими являются потери на коронирование, которые возникают только при достижении критической напряженности электрического поля у поверхности провода, кВ/см

$$E = 0,345 \cdot U \cdot \left(r \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} \right)^{-1} \quad (3.11)$$

Значение критической напряженности составляет 17 – 19 кВ/см, что возможно только для ВЛ напряжением 110 кВ и выше. Для снижения потерь на корону до экономически приемлемого уровня ПУЭ установлены минимальные сечения (диаметры) проводов. Например, для ВЛ напряжением 110 кВ – АС 70 (11,8 мм), для ВЛ 220 кВ – АС 240 (21,6 мм).

4.2. Схемы замещения ВЛ для расчетов симметричных режимов

При расчете симметричных установившихся режимов электроэнергетической системы схему замещения составляют для одной фазы, т.е. продольные параметры ВЛ, сопротивления $\underline{Z} = R + jX$ изображают и вычисляют для одного фазного провода (жилы), а при расщеплении фазы – с учетом проводов в фазе и эквивалентного радиуса фазной конструкции ВЛ.

Емкостная проводимость B_c учитывает проводимости (емкости) между фазами, между фазами и землей и отражает генерацию зарядной мощности всей трехфазной конструкции в начале и конце линии:

$$Q_{c1} = 0,5B_c U_1^2 \quad \text{и} \quad Q_{c2} = 0,5B_c U_2^2.$$

Активная проводимость линии G , изображаемая в виде шунта между фазой (жилой) и точкой нулевого потенциала схемы (землей), включает суммарные потери активной мощности на корону (или в изоляции) трех фаз в начале и в конце линии:

$$\Delta P_{k1} = 0,5G U_1^2 \quad \text{и} \quad \Delta P_{k2} = 0,5G U_2^2, \quad (3.12)$$

Поперечные проводимости (шунты) $\underline{Y} = G + jB$ в схемах замещения можно не изображать, а заменять мощностями этих шунтов. Например, вместо активной проводимости показывают потери активной мощности в начале передачи

$$\Delta P_{k1} = \Delta P_{k2} = 0,5\Delta P_k^0 L, \quad (3.13)$$

или в изоляции кабельной линии

$$\Delta P_{из1} = \Delta P_{из2} = 0,5g_0 L \operatorname{tg} \delta, \quad (3.14)$$

где L – длина линии электропередачи.

Взамен емкостной проводимости указывают генерацию зарядной мощности

$$Q_{c1} = Q_{c2} = 0,5B_c U_{ном}^2. \quad (3.15)$$

Указанный учет поперечных ветвей ЛЭП нагрузками упрощает оценку электрических режимов, выполняемых вручную, поэтому такие схемы замещения называют расчетными. Схемы замещения воздушных линий электропередачи различных классов напряжения, в том числе с моделированием поперечных ветвей ЛЭП нагрузками показаны на рис. 3.2.

Для линий до 220 кВ при определенных условиях можно не учитывать те или иные параметры, если их влияние на работу сети незначительно. В ВЛ напряжением до 220 кВ потери на корону незначительны, поэтому в расчете электрических режимов ими пренебрегают и соответственно принимают нулю активную проводимость. Необходимость учета емкости и зарядной мощности линии зависит от соизмеряемости зарядной и нагру-

зочной мощности. В сетях до 35 кВ зарядные токи и мощности значительно меньше нагрузочных, поэтому в КЛ емкостную проводимость учитывают при напряжениях 20 и 35 кВ, а в воздушных линиях электропередачи ею можно пренебречь.

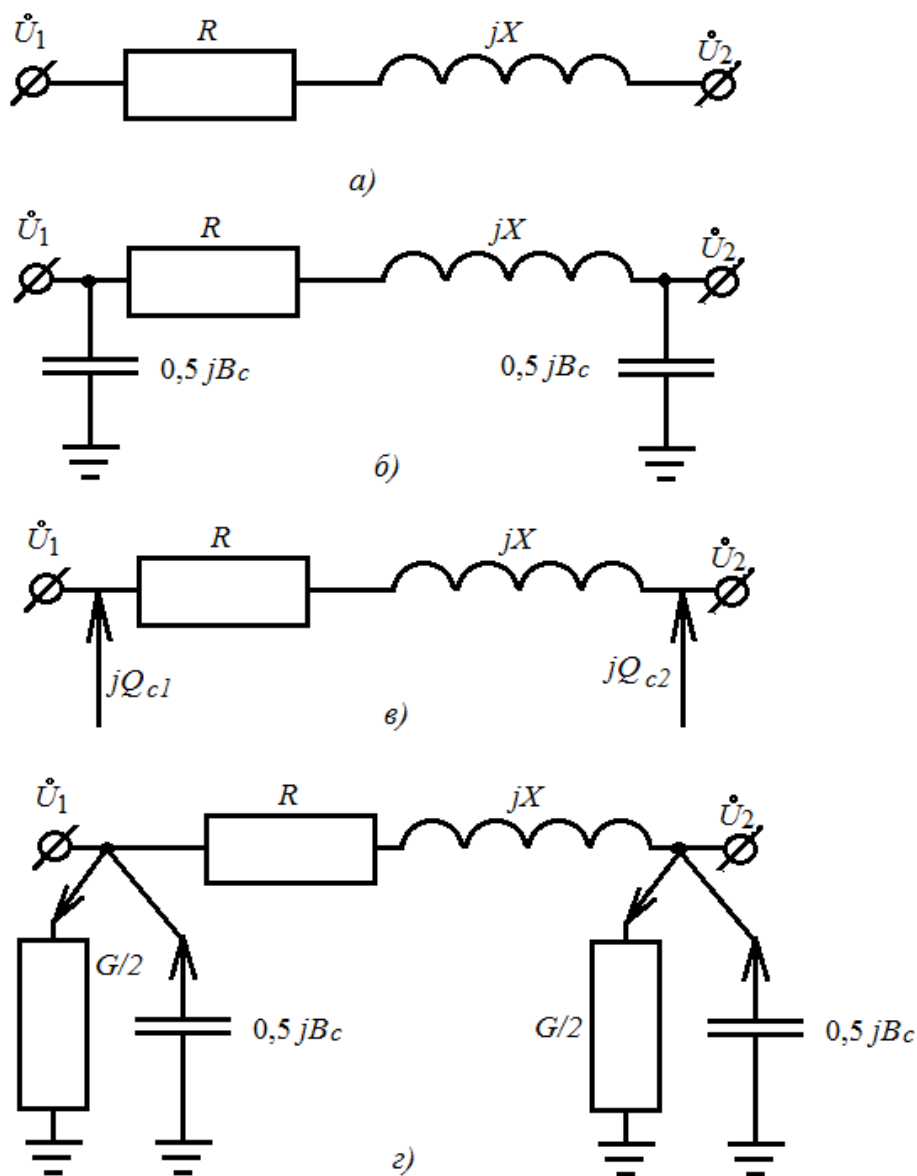


Рис. 3.2. Схемы замещения воздушных линий электропередачи: а) – ВЛ напряжением 0,38 – 35 кВ; б) – ВЛ напряжением 110 – 220 кВ с емкостными проводимостями; в) – ВЛ напряжением 110 – 220 кВ с зарядной мощностью вместо проводимостей; г) – ВЛ напряжением 330 (220) – 500 кВ с поперечными проводимостями.

5. Порядок оформления отчета.

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему или эскиз макета установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения и выводы, а также ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы

6.1. Для каких целей используют схемы замещения линий электропередачи?

6.2. При решении каких задач целесообразно применение П- или Т-образных схем замещения линий электропередачи? Каковы преимущества и недостатки этих схем?

6.3. Какова физическая сущность активного сопротивления токоведущих жил линий электропередачи? Как и в каком случае следует учитывать температуру жилы (провода)?

6.4. Каков физический смысл индуктивного сопротивления воздушных и кабельных линий электропередачи?

6.5. Почему для линий одного исполнения и класса напряжения индуктивные сопротивления практически одинаковые, незначительно зависящие от сечения проводов и жил фаз? Каковы характерные значения этих сопротивлений для ЛЭП различных классов напряжений?

6.6. Как определить удельные (на 1 км) активное и индуктивное сопротивления линии электропередачи, не используя справочники? Что для этого нужно знать?

6.7. Чем обусловлена емкостная проводимость ЛЭП? Поясните её зависимость от сечения проводов и конструкции фаз воздушной линии.

6.8. Почему погонное индуктивное сопротивление на 1 км у воздушных линий традиционного исполнения значительно больше, чем у кабельных ЛЭП?

6.9. С помощью каких изменений конструкции фаз и опор воздушной линии электропередачи можно уменьшить индуктивное сопротивление ЛЭП?

6.10. Зачем выполняют транспозицию фазных проводов ЛЭП?

6.11. В чем заключается сущность коронирования и какие условия необходимы для возникновения коронного разряда?

6.12. Объясните влияние погодных условий на потери мощности на коронирование.

6.13. Какие физические явления отражаются наличием в схеме замещения ВЛ активной проводимости?

6.14. Почему ЛЭП являются источником зарядной (емкостной) мощности?

6.15. Как зависит зарядная мощность от конструкции и номинального напряжения линии?

6.16. В чем причины отличия индуктивных сопротивлений и емкостных токов воздушных и кабельных линий электропередачи?

6.17. Как по параметрам схем замещения ЛЭП местных и районных сетей определить протяженность линий?

6.18. Что является главной изоляцией воздушных и кабельных линий?

6.19. По каким внешним признакам можно определить номинальное напряжение воздушной линии электропередачи?

6.20. Какие элементы трехфазной ЛЭП учитываются в схеме замещения параметрами одной фазы или с учетом параметров и взаимного влияния трех фаз?

6.17. В чем отличие схем замещения ЛЭП постоянного и переменного токов и почему линии постоянного тока обладают повышенной пропускной способностью?

6.18. Почему активное сопротивление стального провода значительно превышает омическое? В чем причина изменений активных сопротивлений проводов из стали?

6.19. Какие физические явления определяют отличия значений индуктивного сопротивления линий с проводами из цветного металла и стали?

6.20. В чем преимущества и недостатки проводов из цветного металла? Каково назначение стальной составляющей в сталеалюминиевом проводе?

6.21. Почему применение чисто стальных проводов ограничено?

6.22. В чем отличие схем замещения ВЛ 35 и 110 кВ? Когда в схемах замещения учитываются поперечные элементы?

6.23. Как отличаются параметры схем замещения ЛЭП при длинах линии менее 350 км и при более 350 км?

Лабораторная работа № 4

Моделирование кабельных линий электропередачи городских электрических сетей


Цель работы: В работе ставится цель – формирование у специалистов - энергетиков знаний в области передачи электрической энергии путем исследования процессов на моделях кабельных линий электропередачи населенных пунктов. В результате проведения работы студенты должны знать методы построения схем замещения кабельных линий электропередачи и методы расчёта их режимов; уметь использовать: базовые знания по теоретическим основам электротехники при решении вопросов получения, преобразования, передачи и распределения электрической энергии: математические модели для анализа режимов электроэнергетических систем; правила устройства электрических установок при проектировании системных объектов; приобрести навыки составления расчётных схем и их схем замещения с учетом параметров кабельных и воздушных линий; формулирования и постановки задач **расчёта** параметров установившихся режимов простейших электрических сетей; использования вычислительной техники для решения сетевых задач.

2. Объект и средства исследования.

Объектом исследования служат процессы в моделях линий электропередачи протяженностью менее 10 – 50 км.

Измерение токов, напряжений и мощности при выполнении лабораторной работы осуществляется амперметрами, ваттметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	электромагнитная	0÷250 В	1
3	Амперметр	электромагнитная	0÷300 А	2
4	Киловаттметр	электромагнитная	0÷100 кВт	1
5	Ваттметр	электродинамическая	0 – 3000 Вт	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

2. Подготовка к работе.

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 6 – 44], [2, с. 52 – 93].

2.2. Определить в соответствии с вариантом задания параметры схемы замещения кабельной линии электропередачи напряжением 10 кВ и их допустимые мощности по данным табл. 3.2.

Таблица 4.2

№ варианта	Марка кабеля	Удельное активное сопротивление, Ом · мм ² /км;	Погонное индуктивное сопротивление, Ом/км	Удельная емкостная мощность q_0 , квар/км	Длина линии, км	Допустимая длительная мощность по нагреву КЛ напряжением 10 кВ МВ · А		
						в земле	в воздухе	в воде
1	СБУ 3х16	1,15	0,113	5,9	5	1,6	1,3	2,0
2	СБУ 3х25	0,727	0,099	8,6	10	1,9	1,8	2,5
3	СБУ 3х35	0,524	0,095	10,7	15	2,4	2,2	3,1
4	СБУ 3х50	0,387	0,090	11,7	20	2,3	2,0	2,9
5	СБУ 3х70	0,268	0,086	13,5	25	2,7	2,5	3,5
6	СБУ 3х95	0,193	0,083	15,6	30	3,4	3,1	4,3
7	СБУ 3х120	0,153	0,081	16,9	35	3,9	3,6	5,0
8	СБУ 3х150	0,124	0,079	18,3	40	4,5	4,1	5,7
9	СБУ 3х185	0,0993	0,077	20,0	45	5,0	4,6	6,6
10	СБУ 3х 240	0,0775	0,075	21,5	50	5,8	5,5	7,6

2.3. Составить электрическую принципиальную схему замещения исследуемой КЛ для проведения опыта на напряжении 220 В с учетом необходимых измерительных приборов. Вычислить масштабные коэффициенты для пересчета данных на номинальное напряжение линии.

2.4. По значению предельно допустимой длительной мощности по нагреву при напряжении 10 кВ вычислить активное сопротивление нагрузки и пересчитать это значение на напряжение 220 В.

2.5. Разработать электромонтажную схему для проведения опыта холостого хода линии и под нагрузкой по п. 2.3 с учетом п. 2.4 при значении питающего напряжения 220 В и составить таблицу для записи результатов измерений (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Режим работы ЛЭП	Холостой ход кабельной линии					Кабельная линия под нагрузкой				
Измеряемый параметр	$U_{ВХ}$ В	$I_{ВХ}$ А	$U_{ВЫХ}$ В	$I_{ВЫХ}$ А	P Вт	$U_{ВХ}$ В	$I_{ВХ}$ А	$U_{ВЫХ}$ В	$I_{ВЫХ}$ А	P Вт
Номер опыта										
1										
2										
3										
4										
5										

2.6. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий раздела 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

3. Рабочее задание

3.1. Собрать электромонтажную схему по п. 2.3 и после проверки схемы преподавателем включить напряжение питания стенда и автотрансформатора. Выставить на зажимах автотрансформатора напряжение 220 В.

3.2. Провести эксперимент по п. 2.5 при значении питающего напряжения 220 В для опытов холостого хода и нагрузки. Повторить опыты при значении питающего напряжения 200 В, 210 В, 230 В, 240 В. Результаты измерений записать в табл. 4.3.

3.3. По результатам экспериментов п. 3.2 рассчитать потери активной мощности в линии в предельных режимах электропередачи и построить графики зависимости этих потерь от значения напряжения питания пересчитанного к 10 кВ. Результаты расчета записать в табл.4.4.

Таблица 4.4

Напряжение питания, В	Воздушная линия электропередачи		Кабельная линия электропередачи	
	Потери холостого хода, $P_{ХХ}$, Вт	Нагрузочные потери, $P_{Н}$, Вт	Потери холостого хода, $P_{ХХ}$, Вт	Нагрузочные потери, $P_{Н}$, Вт
200				
210				
220				
230				
240				

4. Методические указания

4.1. Схемы замещения кабельных линий электропередачи и их параметры.

Обычно линии электропередачи рассматриваются как линии с равномерно распределенными по её длине параметрами. В инженерных расчетах для кабельных линий электропередачи (КЛ) длиной менее 10 – 50 км обычно используют упрощенные Т- и П-образные схемы замещения с сосредоточенными параметрами. При этом погрешности электрического расчета линии практически зависят только от её длины. Выбор схемы замещения линии электропередачи определяется сложностью системы электроснабжения. При расчетах сложных систем электроснабжения на ЭВМ целесообразно использовать П-образную схему замещения с целью упрощения расчетов. Схемы замещения КЛ с сосредоточенными параметрами приведены на рис. 4.1.

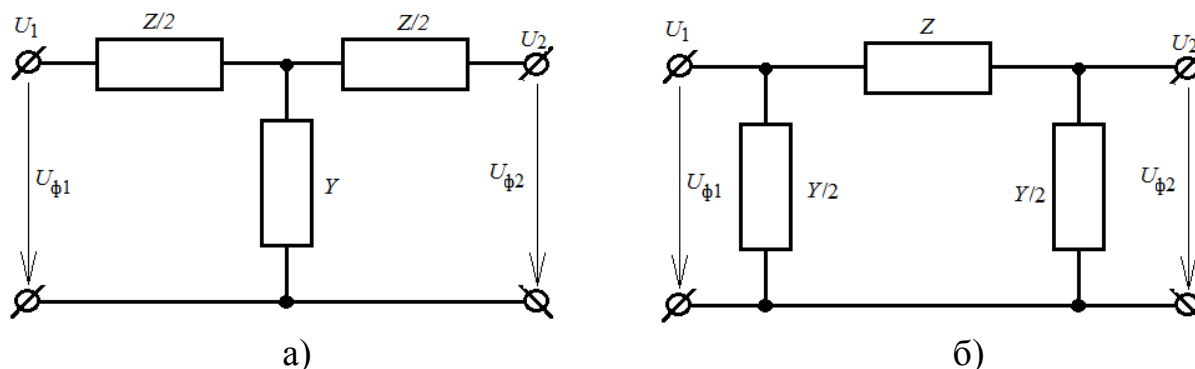


Рис. 4.1. Схемы замещения КЛ с сосредоточенными параметрами
- Т – образная (а) и П – образная (б)

Общепринято в схемах замещения выделять продольные элементы – сопротивления линии электропередачи: $\underline{Z} = R + jX$ и поперечные элементы – проводимости: $\underline{Y} = G + jB$. Значения указанных параметров для КЛ определяются по общему выражению $\Pi = \Pi_0 L$, где $\Pi_0 \{R_0, X_0, g_0, b_0\}$ - значение продольного или поперечного параметра, отнесенного к 1 км линии; L - протяженность линии электропередачи (погонные параметры).

В частных случаях, в зависимости от исполнения КЛ и класса напряжения, используют только доминирующие параметры, в зависимости от их физического проявления.

Активное сопротивление обуславливает тепловые потери и зависит от материала токоведущих проводников и их сечения. Для КЛ с проводами небольшого сечения из цветных металлов активное сопротивление принимают равным омическому, поскольку проявление поверхностного эффекта на промышленной частоте в этом случае не превышает 1 %. Для проводов сечением более 500 мм² явление поверхностного эффекта на промышленной частоте значительно.

Погонное активное сопротивление КЛ (Ом/км) определяется по формуле

$$R_0 = \rho/S, \quad (4.1)$$

где ρ - удельное активное сопротивление металла провода, Ом · мм²/км. Для технического алюминия в зависимости от его марки можно принять $\rho = 29,5 \div 31,5$ Ом · мм²/км, для меди $\rho = 18,0 \div 19,0$ Ом · мм²/км; S – сечение фазного провода (жилы), мм².

Необходимо помнить, что активное сопротивление зависит также от температуры провода, которая определяется температурой окружающей среды (КЛ проложена в земле, в воздухе) и значением протекающего по проводу силы тока. Зависимость активного сопротивления от температуры провода t определяется соотношением

$$R_0^t = R_0^{20} [1 + \alpha(t - 20^\circ\text{C})], \quad (4.2)$$

где R_0^{20} - нормативное значение сопротивления R_0 рассчитывается по соотношению (4.1) при температуре проводника $t = 20^\circ\text{C}$; α - температурный коэффициент электрического сопротивления, 1/град (для медных и алюминиевых проводов $\alpha = 0,00403$).

Индуктивное сопротивление проводника X обусловлено магнитным полем, возникающим внутри и вокруг проводника при протекании по нему переменного тока. В проводнике наводится ЭДС самоиндукции

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt},$$

направленная в соответствии с принципом Ленца, противоположно ЭДС источника. Индуктивное сопротивление X зависит от частоты тока $\omega = 2\pi f$ и индуктивности фазы L

$$X = 2\pi fL = \omega L.$$

Индуктивное сопротивление фаз многофазных ЛЭП зависит также от взаимного расположения фазных проводов (жил). Кроме ЭДС самоиндукции в каждой фазе наводится противодействующая ей ЭДС взаимоиндукции, значение которой в каждой фазе зависит от конструкции линии электропередачи. При сближении фазных проводов влияние ЭДС взаимоиндукции возрастает, что приводит к уменьшению индуктивного сопротивления. Поэтому индуктивное сопротивление кабельных линий в 3 – 5 раз меньше чем аналогичный параметр воздушных линий.

Индуктивное сопротивление, Ом/км, отнесенное к 1 км линии, на частоте тока 50 Гц и $\omega = 2\pi f = 314$ рад/с проводов из цветных металлов определяется по эмпирической формуле как сумма внешнего \dot{X}_0 и внутреннего \ddot{X}_0 индуктивных сопротивлений. Внешнее индуктивное сопротивление определяется внешним магнитным потоком, образованным вокруг проводов и значениями величин $D_{\text{ср}}$ и $r_{\text{пр}}$ (среднегеометрического расстояния между фазными жилами и радиуса многопроволочных проводов соответственно). Внутреннее индуктивное сопротивление определяется внутренним потоком, замыкающимся в проводах.

При расчетах, в отличие от ВЛ, обычно используют заводские данные об индуктивном сопротивлении кабелей, поскольку потребитель не имеет информации о конструктивных особенностях кабелей. Для кабельных линий всех марок и сечений напряжением 0,38 – 10 кВ индуктивное сопротивление находится в интервале 0,06 – 0,10 Ом/км и определяется из таблиц физико-технических данных кабелей.

Из изложенного выше следует, что активное сопротивление КЛ зависит от материала, сечения и температуры провода. Зависимость $R_0 = f(S)$ обратно пропорциональна сечению провода, ярко выражена при малых сечениях, когда R_0 имеет большие значения, и мало заметна при больших сечениях проводов. Индуктивное сопротивление ЛЭП определяется исполнением линии, конструкцией фазы и практически не зависит от сечения проводов (значение $\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} \approx \text{const}$).

Емкостная проводимость обусловлена емкостями между фазами, фазными проводами (жилами) и землей. В практических расчетах рабочую емкость трехфазной воздушной линии электропередачи (ВЛ) с одним проводом в фазе на единицу длины, Ф/км, определяют по формуле

$$C_0 = 0,024 \cdot \left(\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} \right)^{-1} \cdot 10^{-6}. \quad (4.3)$$

Численные данные рабочей емкости $C_0 \cdot 10^{-6}$, трехжильных кабелей с поясной изоляцией, Ф/км, приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм ²										
	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
До 1 кВ	0,35	0,40	0,50	0,53	0,63	0,72	0,77	0,81	0,86	0,86	-
6	0,20	0,23	0,28	0,31	0,36	0,40	0,42	0,46	0,51	0,53	0,58
10	-	-	0,23	0,27	0,29	0,31	0,32	0,37	0,44	0,45	0,60

Емкостная проводимость b_0 кабельной линии, См/км, зависит от конструкции кабеля и указывается заводом изготовителем, но для ориентировочных расчетов может быть оценена по формуле

$$b_0 = \omega C_0 = 7,78 \cdot \left(\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} \right)^{-1} \cdot 10^{-6}. \quad (4.4)$$

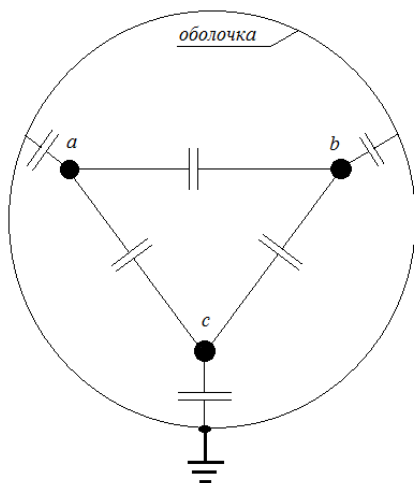


Рис. 4.2. Емкости трехфазной кабельной линии электропередачи

Под действием приложенного к КЛ напряжения через емкости линий протекают емкостные (зарядные) токи. Расчетное значение емкостной силы тока на единицу длины, кА/км

$$I_{c0} = U_{\phi} b_0 = U b_0 / \sqrt{3}. \quad (4.5)$$

Зарядная мощность кабельной линии, обусловленная током I_{c0} , зависит от напряжения в каждой точке линии

$$Q_{c0} = 3U_{\phi} I_{c0} = 3U_{\phi}^2 b_0 = U^2 b_0, \quad (4.6)$$

Значение зарядной мощности для всей КЛ, длиной L , определяется через действительные (расчетные) напряжения начала и конца линии, Мвар:

$$Q_c = 0,5(U_1^2 + U_2^2)b_0L = 0,5(U_1^2 + U_2^2)B_c, \quad (4.7)$$

Эту же мощность можно определить приближенно по номинальному напряжению линии

$$Q_c \approx B_c U_{\text{НОМ}}^2, \quad (4.8)$$

где $B_c = b_0 \cdot L$ - емкостная проводимость кабельной линии, длиной L , См; $U_{\text{НОМ}}$ - номинальное напряжение кабельной линии, кВ.

Для кабелей напряжением 6 – 35 кВ с бумажной изоляцией и вязкой пропиткой известны генерации реактивной мощности q_0 на один километр линии (см. табл. 4.6), с учетом которой общая генерация КЛ

$$Q_{c \text{ кл}} = q_0 L. \quad (4.9)$$

Таблица 4,6

Расчетные характеристики трехжильных кабелей с бумажной изоляцией

Номинальное сечение, мм ²	Активное сопротивление жил при температуре 20°C		Удельное индуктивное сопротивление X_0 , Ом/км					Удельная емкостная мощность q_0 , квар/км				
	алюминий	медь	Номинальное напряжение кабеля, кВ									
			До 1	6	10	20	35	6	10	20	35	
10	3,10	1,84	0,073	0,110	0,122	-	-	-	2,3	-	-	-
16	1,94	1,15	0,0675	0,102	0,113	-	-	-	2,6	5,9	-	-
25	1,24	0,74	0,0662	0,091	0,099	0,135	-	-	4,1	8,6	24,8	-
35	0,89	0,52	0,0637	0,087	0,095	0,129	-	-	4,6	10,7	27,6	-
50	0,62	0,37	0,0625	0,083	0,090	0,119	-	-	5,2	11,7	31,8	-
70	0,443	0,26	0,0612	0,080	0,086	0,116	0,137	-	6,6	13,5	35,9	86
95	0,326	0,194	0,0602	0,078	0,083	0,110	0,126	-	8,7	15,6	40,0	95
120	0,258	0,153	0,0602	0,076	0,081	0,107	0,120	-	9,5	16,9	42,8	99
150	0,206	0,122	0,0596	0,074	0,079	0,104	0,116	-	10,4	18,3	47,0	112
185	0,167	0,099	0,0596	0,073	0,077	0,101	0,113	-	11,7	20,0	51,0	115
240	0,129	0,077	0,0587	0,071	0,075	-	-	-	13,0	21,5	52,8	119
300	0,105	0,062	-	0,063	0,066	-	-	-	-	-	57,6	127
400	0,078	0,047	-	-	-	0,092	-	-	-	-	64,0	-

Активная проводимость КЛ обусловлена потерями активной мощности ΔP_k из-за несовершенства изоляции. Удельная проводимость g_0 определяется по общей формуле для шунта, См/км

$$g_0 = \Delta P_k \cdot 10^{-3} / U_{\text{НОМ}}^2, \quad (4.10)$$

В кабельной линии под влиянием наибольшей напряженности находится слой поясной изоляции у поверхности жил кабеля. Чем выше рабочее напряжение кабеля, тем заметнее токи утечки через материал изоляции и нарушение её диэлектрических свойств (увеличение тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$)/

Активная проводимость кабеля на единицу длины, См/км

$$g_0 = \omega C_0 \cdot \text{tg}\delta = b_0 \cdot \text{tg}\delta, \quad (4.11)$$

и соответствующий ток утечки в изоляции кабеля

$$I_y = U_\phi \cdot b_0 \cdot L \cdot \text{tg}\delta = \frac{1}{\sqrt{3}} U \cdot B_c \cdot \text{tg}\delta, \quad (4.12)$$

где $B_c = b_0 L$

Тогда диэлектрические потери в материале изоляции КЛ, МВт, которые обязательно следует учитывать для КЛ с номинальным напряжением 110 кВ и выше можно определить по формуле (4.13).

$$\Delta P_{\text{из}} = 3I_y^2 \frac{1}{\omega C_0 \text{tg}\delta} L = U^2 g_0 L = U^2 \omega C_0 L \cdot \text{tg}\delta = U^2 G, \quad (4.13)$$

где $G = g_0 L = \omega C_0 L \cdot \text{tg}\delta$ – активная проводимость КЛ с учетом её длины.

4.2. Схемы замещения КЛ для расчетов симметричных режимов

При расчете симметричных установившихся режимов электроэнергетической системы схему замещения составляют для одной фазы, т.е. продольные параметры КЛ, сопротивления $\underline{Z} = R + jX$ изображают и вычисляют для одного фазного провода (жилы).

Емкостная проводимость B_c учитывает проводимости (емкости) между фазами, между фазами и землей и отражает генерацию зарядной мощности всей трехфазной конструкции в начале и конце линии:

$$Q_{c1} = 0,5B_c U_1^2 \quad \text{и} \quad Q_{c2} = 0,5B_c U_2^2.$$

Активная проводимость линии G , изображаемая в виде шунта между фазой (жилой) и точкой нулевого потенциала схемы (землей), включает суммарные потери активной мощности на корону (или в изоляции) трех фаз в начале и в конце линии:

$$\Delta P_{k1} = 0,5G U_1^2 \quad \text{и} \quad \Delta P_{k2} = 0,5G U_2^2, \quad (4.14)$$

Поперечные проводимости (шунты) $\underline{Y} = G + jB_c$ (рис. 4.3,в и 4.3,д) в схемах замещения кабельных линий электропередачи можно не изображать, а заменять мощностями этих шунтов (рис. 4.3,г). Например, вместо активной проводимости показывают потери активной мощности в изоляции кабельной линии

$$\Delta P_{из1} = \Delta P_{из2} = 0,5g_0 L \operatorname{tg} \delta, \quad (4.15)$$

а взамен емкостной проводимости указывают генерацию зарядной мощности

$$Q_{c1} = Q_{c2} = 0,5B_c U_{ном}^2. \quad (4.16)$$

В кабельных линиях напряжением до 10 кВ небольших сечений (50 мм² и менее) определяющим является активное сопротивление, и в таком случае индуктивные сопротивления могут не учитываться (рис. 4.3,а). Диэлектрические потери кабельных линий напряжением до 35 кВ незначительны и в расчетах электрических режимов ими пренебрегают и соответственно принимают равной нулю активную проводимость (рис. 4.3,в).

Учет активной проводимости необходим для кабельных линий напряжением 110 кВ и выше в расчетах, требующих вычисления потерь электроэнергии. В местных сетях небольшой протяженности при номинальных напряжениях до 35 кВ зарядные токи и мощности значительно меньше нагрузочных, поэтому в КЛ емкостную проводимость учитывают только при напряжениях 20 и 35 кВ.

Необходимость учета индуктивных сопротивлений зависит также от доли реактивной составляющей тока в общей электрической нагрузке. При анализе электрических режимов с низким коэффициентом мощности ($\cos \varphi < 0,8$) индуктивное сопротивление кабельной линии необходимо учитывать, чтобы избежать ошибки при определении потери напряжения.

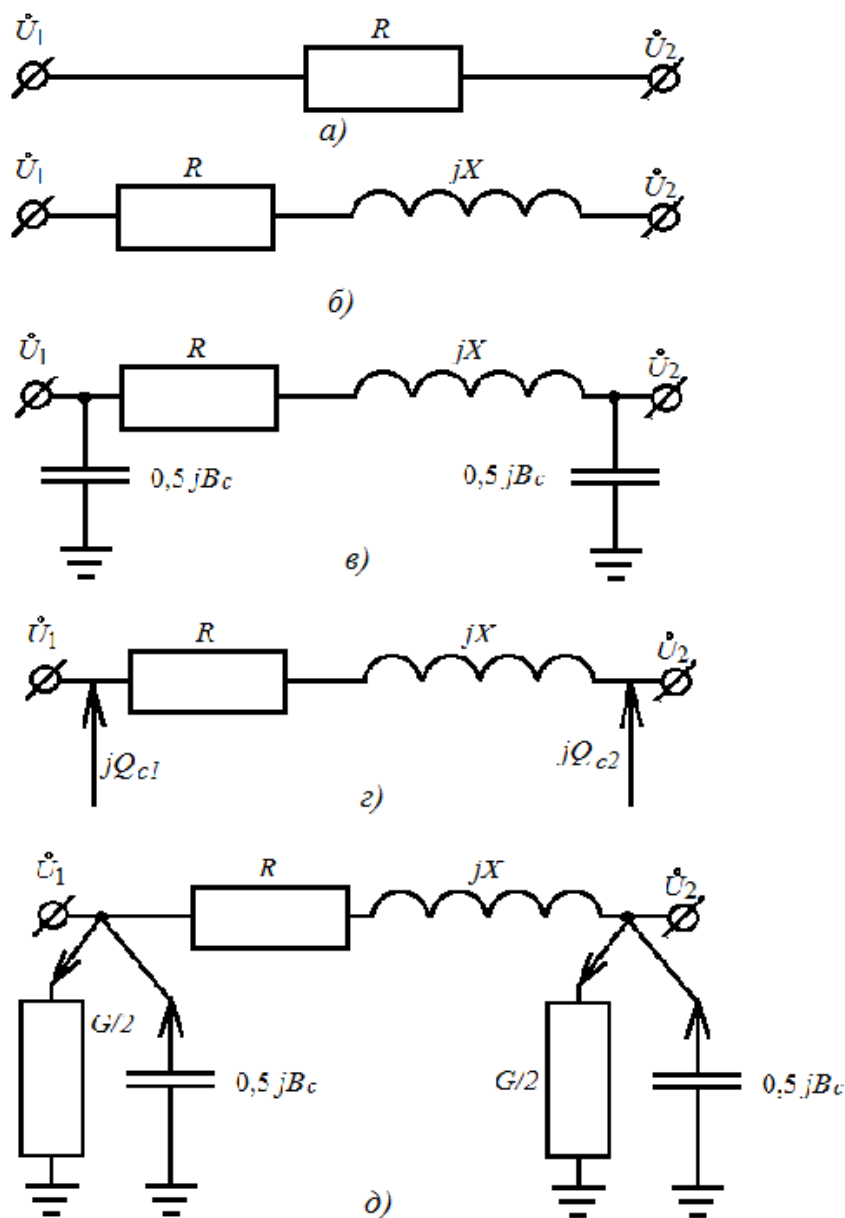


Рис. 4.3. Схемы замещения воздушных линий электропередачи: а) – КЛ напряжением 0,38 – 10 кВ малых сечений; б) – КЛ напряжением 0,38 – 20 кВ; в) – КЛ напряжением 35 кВ с емкостными проводимостями; г) – КЛ напряжением 35 кВ с зарядной мощностью вместо емкостных проводимостей; д) – КЛ напряжением 110 – 500 кВ с поперечными проводимостями.

5. Порядок оформления отчета.

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему или эскиз макета установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения и выводы, а также ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы

6.1. Какова физическая сущность активного сопротивления КЛ? Как и в каком случае следует учитывать температуру провода?

6.2. Каков физический смысл индуктивного сопротивления кабельных линий? Почему для линий одного исполнения и класса напряжения индуктивные сопротивления практически одинаковые, незначительно зависящие от сечения проводов и жил фаз? Каковы характерные значения этих сопротивлений для КЛ различных напряжений?

6.3. Как определить удельные (на 1 км) активное и индуктивное сопротивления КЛ, не используя справочников? Что для этого нужно знать?

6.4. От чего зависит активная проводимость кабельных линий? Чем определяется качество изоляции линий?

6.5. Какие физические явления отражаются наличием в схеме замещения КЛ активной проводимости?

6.6. Сравните индуктивные сопротивления и емкостные токи воздушных и кабельных линий. Где они больше? Почему?

6.7. Что является главной изоляцией кабельных линий?

6.8. При каких длинах КЛ возможен отказ от учета распределенности параметров для П-образной схемы замещения?

6.9. В каких случаях в схемах замещения КЛ небольшого сечения необходимо учитывать индуктивное сопротивление?

6.10. Чем определяется отличие погонных параметров ВЛ и КЛ?

6.11. В чем отличие схем замещения КЛ напряжением 35 и 110 кВ? Когда в схемах замещения учитываются поперечные элементы?

6.12. С какой целью используются схемы замещения КЛ?

6.13. Почему КЛ являются источником зарядной (емкостной) мощности? Как зависит зарядная мощность от конструкции и номинального напряжения линии?

6.14. Как по параметрам схем замещения КЛ местных и районных сетей определить протяженность линий?

Лабораторная работа № 5

Определение целости жил силовых кабелей и фазировка кабельных линий

Цель работы: В работе ставится цель – приобретение практических навыков у специалистов - энергетиков при выполнении работ по определению целости токоведущих жил и фазировке кабельных линий. В результате проведения работы студенты должны знать методы определения соответствия фазы кабеля, находящейся под напряжением от распределительного устройства подстанции с предполагаемой одноименной фазой шин распределительного устройстве, где производится фазировка; уметь использовать: базовые знания по теоретическим основам электротехники при решении вопросов по определению целости токоведущих жил и фазировке кабельных линий; приобрести навыки составления расчётных схем и их схем замещения с учетом параметров кабельных и воздушных линий; формулирования и постановки задач **расчёта** параметров установившихся режимов простейших электрических сетей; использования вычислительной техники для решения сетевых задач.

1. Объект и средства исследования.

Объектом исследования служат кабели ЛЭП при выполнении процедуры фазировки, при их введении в эксплуатацию после сооружения или ремонта, предназначенные для передачи и распределения электрической энергии, т. е. силовые, состоящие из следующих основных конструктивных элементов: токопроводящих жил, изоляции, оболочек и защитных покровов.

Измерение токов, напряжений и мощности при выполнении лабораторной работы осуществляется амперметрами, ваттметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	электромагнитная	0÷250 В	1
3	Амперметр	электромагнитная	0÷300 А	2
4	Киловаттметр	электромагнитная	0÷100 кВт	1
5	Ваттметр	электродинамическая	0 – 3000 Вт	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

2. Подготовка к работе.

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 6 – 44], [3], [6].

2.2. Ознакомиться со схемой установки, расположением её элементов и правилами безопасной работы на установке. Необходимо помнить, что фазировка производится только на отключенных с двух сторон кабельных линиях. При этом должны быть приняты меры по предотвращению несанкционированного включения напряжения на линию. Перед началом фазировки для снятия остаточного заряда кабель необходимо заземлить на 2 – 3 минуты.

2.3. По формулам 5.1 определить допустимое значение тока к.з. для кабельной линии по условию её термической стойкости в зависимости от материала и сечения жил кабелей, а также длительности прохождения тока короткого замыкания.

2.4. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий раздела 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

3. Рабочее задание

3.1. Провести внешний осмотр указателя напряжения, убедиться в отсутствии повреждений, и проверить его исправность в следующей последовательности:

- щупом трубки, содержащей сопротивление, касаются заземления, а щуп другой трубки подносят к выводу аппарата находящегося под напряжением. В момент касания сигнальная лампа должна загореться;

- щупами двух трубок коснутся одного токоведущего вывода, при этом свечение сигнальной лампы должно отсутствовать.

3.2. Проверить наличие напряжения на всех шести фазируемых выводах.

3.3. Выполнить фазировку линии электропередачи. Для этого щупом одной трубки указателя напряжения касаются любого крайнего вывода (любой фазы), находящегося под напряжением, а щупом другой трубки

следует поочерёдно касаться трех выводов со стороны фазируемой линии. Отсутствие свечения сигнальной лампы указывает на одноименность фаз.

3.4. Повторить операцию фазировки для определения остальных одноименных пар выводов.

3.5. Выполнить операцию фазировки кабельной линии по методу вольтметра в соответствии со схемой, показанной на рис. 5.4.

4. Методические указания

4.1. Методики определения целости жил и фазировки кабельных линий

При введении в эксплуатацию новых электрических линий, а также после проведения ремонтных работ на действующих линиях обязательно производится проверка целости жил и фазировка кабельных линий. Технический смысл фазировки жил кабеля заключается в определении соответствия фазы кабеля, находящейся под напряжением от распределительного устройства с предполагаемой одноименной фазой шин распределительного устройства, где производится фазировка. При этом под фазой трёхфазной системы понимают отдельный участок трёхфазной цепи, по которому проходит один и тот же ток, сдвинутый относительно двух других по фазе. Для обозначения фаз используются прописные буквы **A**, **B**, **C** или цветовая маркировка. Необходимо помнить, что по определению фазовым углом или просто фазой также называется угол, характеризующий определённую стадию периодически изменяющегося параметра, например, напряжения.

В соответствии с ПУЭ при переменном трехфазном токе шины фазы A окрашиваются в жёлтый цвет, фазы B – в зелёный цвет и фазы C – в красный цвет. Шины однофазного тока, если они являются ответвлением от шин трёхфазной системы, обозначаются как соответствующие шины трёхфазного тока.

*Проводники защитного заземления во всех электроустановках, а также нулевые защитные проводники в электроустановках напряжением до 1 кВ с глухозаземлённой нейтралью обозначаются **РЕ** и имеют **цветовое обозначение чередующимися продольными или поперечными полосами одинаковой ширины (15-100 мм) желтого и зеленого цветов.** Защитный (**РЕ**) проводник это проводник, предназначенный для целей электробезопасности.*

*Нулевые рабочие (нейтральные) проводники обозначаются буквой **N** и голубым цветом.* Такие проводники в установках до 1 кВ предназначены для питания электроприёмников и соединяются с глухозаземлённой ней-

тралью генератора или трансформатора в сетях трёхфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, или с глухозаземленной точкой источника в сетях постоянного тока.

*Совмещенный нулевой защитный и нулевой рабочий проводник имеет буквенное обозначение **PEN** и цветовое обозначение голубой цвет по всей длине и желто-зеленые полосы на концах.* Этот проводник в электропроводках до 1 кВ совмещает функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников. При постоянном токе положительная шина (+) обозначается красным цветом, отрицательная (-) – синим и нулевая рабочая – голубым цветом.

Трёхфазные системы могут отличаться порядком следования фаз, под которым понимается порядок, в котором э.д.с. трёх фаз непрерывно проходит через одни и те же значения. Различают прямой порядок следования фаз, при котором выполняется последовательность следования фаз **A, B, C** и обратный - **A, C, B**. В отличие от термина “порядок следования фаз” под термином «чередование фаз» понимают очередность, в которой фазы трёхфазной цепи расположены в пространстве. Расположение шин в распределительных устройствах кроме комплектных сборных ячеек одно-стороннего обслуживания (КСО) и комплектных распределительных устройств (КРУ) 6 - 10 кВ, а также панелей 0,4 - 0,69 кВ заводского изготовления, регламентируется ПУЭ. Так, в распределительных устройствах 6 - 220 кВ при переменном трёхфазном токе сборные и обходные шины, а также все виды секционных шин располагаются в следующем порядке:

а) при горизонтальном расположении:

- одна под другой: сверху вниз **A-B-C**;

- одна за другой, наклонно или треугольником: наиболее удаленная шина - **A**, средняя - **B**, ближайшая к коридору обслуживания – **C**.

б) при вертикальном расположении (в одной плоскости или треугольником): слева направо **A-B-C** или наиболее удаленная шина **A**, средняя – **B**, ближайшая к коридору обслуживания – **C**.

в) ответвления от сборных шин, если смотреть на шины из коридора обслуживания:

- при горизонтальном расположении: слева направо **A-B-C**;

- при вертикальном расположении (в одной плоскости или треугольником): сверху вниз **A-B-C**.

В пяти- и четырехпроводных цепях трёхфазного переменного тока в электроустановках напряжением до 1 кВ предусматривается следующее расположение шин:

а) при горизонтальном расположении:

- одна под другой: сверху вниз **A-B-C-N-PE (PEN)**;

- одна за другой: наиболее удалённая шина **A**, затем фазы **B-C-N**, ближайшая к коридору обслуживания – **PE (PEN)**;

б) при вертикальном расположении: слева направо *A-B-C-N-PE(PEN)* или наиболее удалённая шина *A*, затем фазы *B-C-N*, ближайшая к коридору обслуживания – *PE(PEN)*;

в) ответвления от сборных шин, если смотреть на шины из коридора обслуживания:

- при горизонтальном расположении: слева направо *A-B-C-N-PE(PEN)*;

- при вертикальном расположении: *A-B-C-N-PE(PEN)* сверху вниз.

Несоблюдение порядка следования фаз и чередования фаз приводит к возникновению короткого замыкания (к.з.). Варианты несовпадения фаз двух электроустановок показаны на рис. 5.1. При этом на рис.5.1,а показан случай ошибки монтажа, когда фазы одноименных напряжений совпадают (см. векторную диаграмму), а порядок чередования обозначений зажимов у выключателя - не совпадают. На рис.5.1,б наоборот приведен вариант, когда порядок чередования фаз совпадает, а фазуемые напряжения оказываются сдвинутыми по фазе (разные группы соединения обмоток). Исключить возможность возникновения короткого замыкания возможно при совпадении, как фаз одноименных напряжений, так и порядка их чередования. Вариант такого включения электроустановок приведен на рис.5.2.

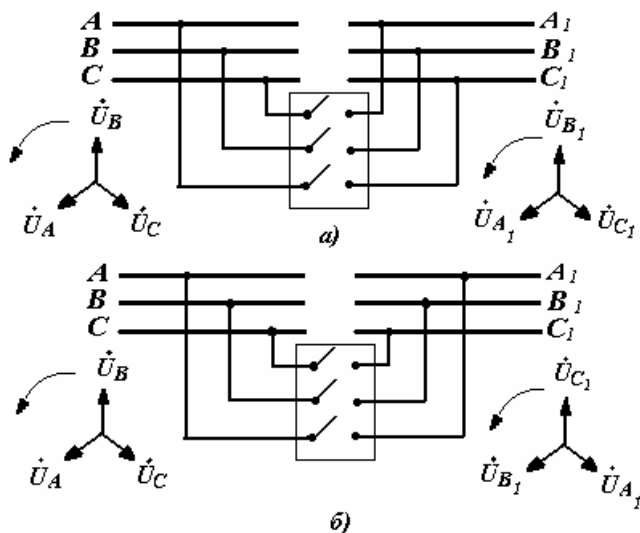


Рис. 5.1. Варианты несовпадения фаз двух электроустановок

Рис. 5.1. Варианты несовпадения фаз двух электроустановок

Определение токов к.з. и проверка оборудования и линий по термической и динамической стойкости для случая аварийной ситуации проводится в соответствии с рекомендациями ПУЭ. Допустимое значение тока к.з. для кабельной линии по условию её термической стойкости определяется в зависимости от материала и сечения жил кабелей, а также длительности прохождения тока к.з.

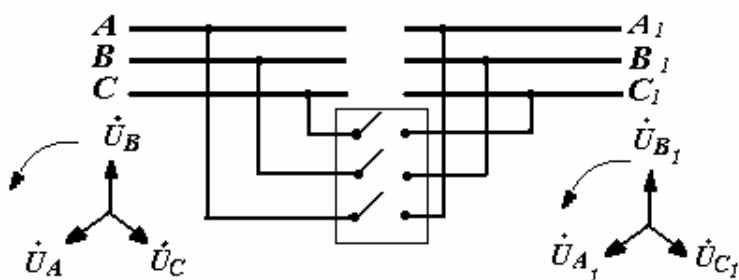


Рис. 5.2. Вариант совпадения фаз двух электроустановок

Сечение S , при котором проводник обладает термической стойкостью к току короткого замыкания, при заданном значении приведенного времени $t_{пр}$ определяется по формуле

$$S = I_{\infty} \cdot \sqrt{t_{пр}} / C, \quad C = \sqrt{\frac{\gamma_{жс} C_{жс} (T_{кз} - T_n)}{0,24\rho \left\{ 1 + \alpha \left[(T_n - T_0) + \frac{T_{кз} - T_n}{2} \right] \right\}}}, \quad (5.1)$$

где $t_{пр}$ - допустимая продолжительность тока короткого замыкания, с;

I_{∞} - действующее значение установившегося тока к.з., А;

C - термический коэффициент.

$T_{кз}$ - допустимая температура жилы при к.з., °С;

$\gamma_{жс}$ - плотность материала жилы, г/см³;

$C_{жс}$ - удельная теплоёмкость жилы, Дж/(кг · К);

ρ - удельное сопротивление жилы, Ом · см;

α - температурный коэффициент материала жилы;

T_n - температура нагрева жилы в нормальном режиме, °С;

T_0 - температура окружающей среды, °С.

Расчетные значения термического коэффициента C приведены в табл.5.2,

где в числителе указаны значения для температуры окружающей среды

$T_0 = 15^\circ\text{C}$, в знаменателе $T_0 = 25^\circ\text{C}$

Расчетные значения термического коэффициента C для кабелей с алюминиевыми жилами приведены в табл.5.2, где в числителе указаны значения для температуры окружающей среды $T_0 = 15^\circ\text{C}$, в знаменателе $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

Таблица 5.2

Тип кабеля	Допустимая температура, °С		Загрузка линии до момента к.з.			
	длительная	при к.з.	$0,5P_n$	$0,65P_n$	$0,75P_n$	P_n
С бумажной изоляцией напряжением:						
35 кВ	50	125	86/84	84/82	81/80	73/74
20 кВ	55	125	86/83	82/81	80/78	70/71
10 кВ	60	200	107/105	104/103	101/101	94/95
6 кВ	65	200	106/105	103/102	106/105	92/93
С изоляцией из полиэтилена и поливинилхлорида	70	120 130 160	82/79 86/83 94/95	77/75 81/79 91/90	72/73 77/76 88/87	59/60 64/65 77/78
С бумажной изоляцией на 1 кВ	80	200	105/103	100/100	97/97	85/87
С изоляцией из вулканизированного полиэтилена	90	250	114/113	110/109	109/106	95/96

Допустимые значения токов короткого замыкания, для кабелей напряжением 6 - 10 кВ с бумажной изоляцией и 100% номинальной нагрузкой указаны в таблицах ПУЭ для алюминиевых и медных токопроводящих жил. При расчёте токов к.з. в сетях 6 - 10 кВ приведенное время может быть принято равным действительному.

Изменение маркировки зажимов электрических машин и аппаратов приводит к изменению режимов их работы и, возможно, возникновению аварийной ситуации. В соответствии со стандартом основными схемами соединения обмоток электрических машин (двигателей, генераторов, трансформаторов и т.д.) являются «звезда» (Y) и «треугольник» (Δ). Преднамеренное или случайное изменение маркировки зажимов обмотки приводит к изменению направления вектора э.д.с. наводимой в этой обмотке на противоположное. Такой же результат получается при изменении направления намотки обмотки. Для того, чтобы исключить возможные ошибки и систематизировать все многообразие схем соединения обмоток трансформаторов используется понятие «группа соединений», которое характеризует угловое смещение векторов линейных э.д.с. вторичных обмоток относительно одноименных векторов линейных э.д.с. первичных обмоток. Группа соединений обозначается числом, которое при умножении на 30° даёт угол отставания вектора э.д.с. вторичной обмотки. Если, например, схема и группа соединений трансформатора обозначена Y/Δ-11, то смещение векторов линейных э.д.с. равно 330° . На параллельную работу включаются трансформаторы с одинаковой группой соединения обмоток.

В соответствии с нормативными документами рекомендуется применять две группы соединения обмоток трёхфазных двухобмоточных трансформаторов: 0 и 11. Однако на практике могут встречаться 12 групп, а также такие соединения, которые нельзя отнести ни к одной из групп. Как правило, они возникают вследствие ошибок, допущенных при монтаже и ремонте оборудования.

Выбор метода фазировки, как обязательной технологической операции проводимой при вводе оборудования в работу после монтажа или ремонта, зависит от его вида (линия, трансформатор, генератор) и класса напряжения, на которое оно рассчитано. Следует различать прямые и косвенные методы фазировки. Прямыми методами называются такие, которые используются для фазировки оборудования, находящегося под напряжением. Прямые методы используются в установках до 110кВ. Косвенными называются методы, в которых фазировку проводят с помощью трансформаторов напряжения, которые подключены к фазлируемым частям установки. Данные методы могут применяться в различных установках независимо от класса её напряжения.

4.2. Приборы и оборудование для выполнения фазировки кабельных линий

В электрических сетях 0,4 кВ для выполнения фазировки вновь вводимого в эксплуатацию кабеля с кабелем находящимся под напряжением может быть использован вольтметр с диапазоном измерений, рассчитанным на двойное фазное или двойное линейное напряжение. Схема выполнения фазировки приведена на рис. 5.4.

Кабель, который вводится в эксплуатацию, с одного конца подключается к шинам, а на другом конце измеряется напряжение между одноименными фазами действующего и нового кабеля. Фазировка силового кабеля выполнена правильно в том случае, когда напряжение между одноименными фазами равно нулю, а между разноименными фазами равно линейному напряжению.

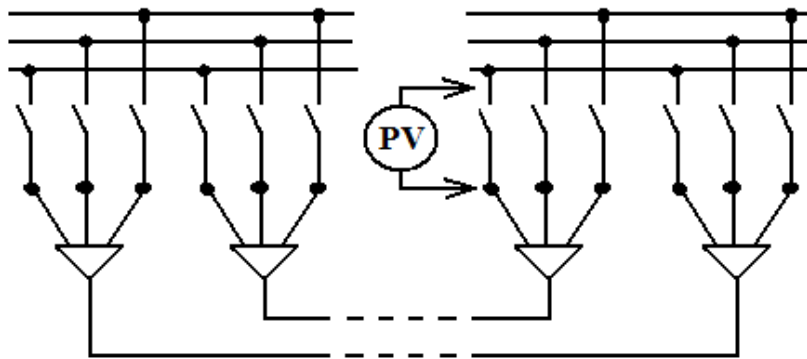


Рис. 5.4. Фазировка силовых кабелей под напряжением в сетях 0,4 кВ с помощью вольтметра

При параллельном подключении двух силовых кабелей до включения необходимо убедиться, что подключение произведено в соответствии с маркировкой и между их жилами отсутствует короткое замыкание. Такая проверка выполняется с помощью контрольной лампы, питаемой от постороннего источника, или мегаомметра по схеме приведенной на рис. 5.5.

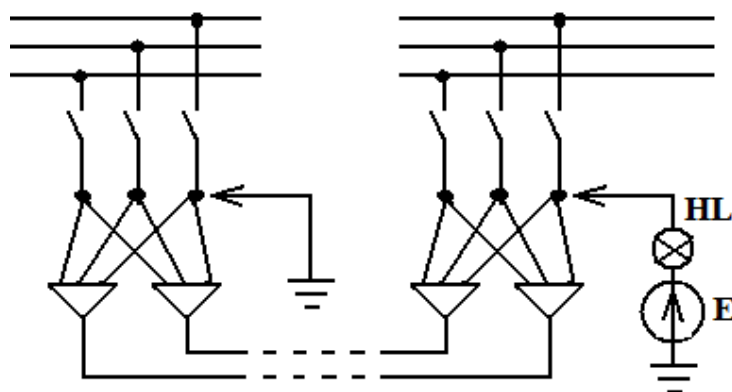


Рис. 5.5. Фазировка двух силовых кабелей при отсутствии напряжения

Обесточенные кабельные линии можно сфазировать при помощи мегаомметра путем измерения сопротивлений жил. Для этого поочередно заземляют жилы в начале кабеля, а в конце кабеля мегаомметром измеряют сопротивление изоляции жил относительно земли. Менее трудоёмким является способ, который заключается в следующем. С одного конца силового кабеля одна из жил заземляется, вторая жила заземляется через сопротивление 8 - 10 МОм, а третья жила не заземляется. На противоположном конце кабеля измеряются сопротивления жил относительно земли. По показаниям прибора легко определить последовательность следования фаз. Сопротивление заземленной жилы будет равно нулю, жилы заземлённой через сопротивление – значению этого сопротивления, а у незаземленной жилы - бесконечно большим.

В сетях с напряжением до 500 В для определения порядка следования фаз может использоваться прибор ФУ-2, принцип действия которого такой же, как у асинхронного двигателя. Прибор содержит три обмотки расположенные на ферромагнитных сердечниках и алюминиевый диск. В том случае, когда фазы исследуемой сети совпадают с маркировкой на приборе, диск вращается в направлении указанном стрелкой на корпусе прибора. Такое вращение соответствует прямому порядку следования фаз. Вращение диска в противоположном направлении - обратному порядку следования фаз.

Порядок следования фаз можно определить универсальным прибором вольт-ампер-фазометром ВАФ-85, который позволяет производить измерения действующего значения напряжения и тока промышленной частоты и их фазовые сдвиги, а также определять правильность следования фаз. Угол сдвига фаз определяется относительно трёхфазной системы напряжения. Предел допустимой основной погрешности этого прибора при измерении переменного напряжения и тока не превышает 4%, угла сдвига фаз – 1,5%. Для определения порядка следования фаз трехфазное напряжение подводится к контактным зажимам «А», «В», «С» прибора, затем отжимается рукоятка верньера чтобы обеспечить вращение свободной оси фазорегулятора. Вращение лимба прибора по часовой стрелке указывает на прямой порядок следования фаз.

В установках напряжением выше 1000 В для выполнения фазировки кабельных линий электропередачи широко применяются указатели напряжения. В комплект указателя, как правило, входят: собственно указатель напряжения, трубка с добавочными резисторами и соединительный проводник. Внешний вид указателя напряжения типа УВНФ показан на рис. 5.6., а схема его подключения при фазировке в сетях 6 - 10 кВ показана на рис. 5.7.

В корпусе указателя напряжения расположена сигнальная лампа, параллельно которой включен высоковольтный конденсатор. Для проверки

фазировки щупы указателя подносят к токоведущим частям установки и следят за свечением сигнальной лампы. В том случае, когда щупы указателя напряжения касаются различных фаз, сигнальная лампа ярко светится. Отсутствие свечения лампы свидетельствует о том, что щупы указателя касаются одной и той же фазы.

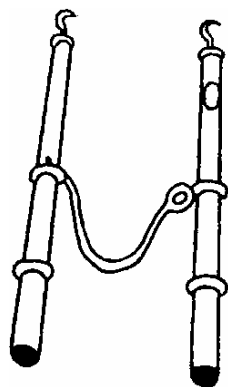


Рис. 5.6. Указатель напряжения типа УВНФ и соединенная с ним гибким проводником трубка сопротивления.

С целью устранения ложного срабатывания сигнальной лампы в процессе эксплуатации указатели напряжения подвергаются испытаниям, в ходе которых измеряется порог зажигания лампы. Так в указателях напряжения применяемых в сетях 10 кВ напряжение зажигания сигнальной лампы при включении на одну фазу должно быть не ниже 12,7 кВ, а разные фазы - 2,75 кВ. Зажигание лампы при подключении щупов на одну фазу объясняется влиянием емкостей элементов указателя на заземлённые конструкции. Протекание тока через эти ёмкости и вызывает свечение лампы.

Высоковольтные кабели фазированы с помощью трансформаторов напряжения, установленных на центрах питания (ЦП).

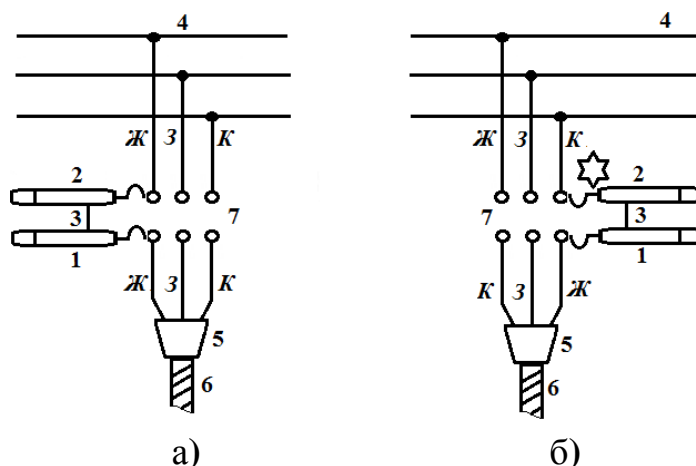


Рис. 5.7. Фазировка кабельной линии под напряжением: а — соответствие фаз кабеля и шин; б — разные фазы шин и кабеля в месте присоединения последнего; 1 — указатель напряжения; 2 — трубка сопротивления; 3 — провод; 4 — шина; 5 — концевая заделка; 6 — кабель; 7 — разъем спуска шин.

5. Порядок оформления отчета.

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему или эскиз макета установки, резуль-

таты измерений и расчётов, необходимые построения и выводы, а также ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы

- 6.1. В чём заключается смысл фазировки кабельных линий.
- 6.2. Дайте определение фазы многофазной системы напряжений и фазового угла.
- 6.3. Перечислите, какую стандартную цветовую маркировку имеют фазы в трёхфазных цепях.
- 6.4. Объясните, в чем отличие терминов «порядок следования фаз» и «порядок чередования фаз».
- 6.5. Укажите, какие функции выполняет защитный (*PE*) проводник.
- 6.6. Объясните, какие функции выполняет (*PEN*) проводник.
- 6.7. Укажите цветовую маркировку и последовательность расположения шин в трёхфазных установках до 1 кВ.
- 6.8. Укажите, в какой последовательности располагаются шины в распределительных устройствах 6 - 220кВ.
- 6.9. Объясните, что понимается под термином “группа соединения обмоток” электрической машины.
- 6.10. Объясните, чем отличаются прямые методы выполнения фазировки от косвенных.
- 6.11. Перечислите приборы, которые могут использоваться для фазировки кабельных линий.
- 6.12. Укажите последовательность, в которой выполняется фазировка кабельных линий.
- 6.13. Объясните, как выполняется фазировка кабельных линий с помощью мегаомметра.
- 6.14. Перечислите возможные аварийные ситуации, которые могут возникать в электрических сетях вследствие неправильной фазировки.
- 6.15. Приведите формулы, с помощью которых можно определить допустимое значение тока короткого замыкания для кабельной линии по условию её термической стойкости.
- 6.16. Назначение и устройство указателя напряжения типа УВНФ.
- 6.17. Порядок выполнения операции фазировки указателем напряжения типа УВНФ.

Лабораторная работа № 6

Определение вида и места повреждения кабельных линий

Цель работы: В работе ставится цель – изучение методики определения характера и места повреждения кабельных линий. Приобретение практических навыков эксплуатации приборов применяемых для определения места повреждения. В результате проведения работы студенты должны знать методики определения характера и места повреждения кабельных линий, принципы построения приборов применяемых для определения места повреждения; уметь использовать: базовые знания по теоретическим основам электротехники при решении вопросов по определению целостности токоведущих жил и места повреждения кабельных линий; приобрести навыки эксплуатации приборов применяемых для определения места повреждения, составления расчётных схем и их схем замещения с учетом параметров кабельных и воздушных линий; формулирования и постановки задач **расчёта** параметров установившихся и аварийных режимов простейших электрических сетей; использования вычислительной техники для решения сетевых задач.

1.Объект и средства исследования.

Объектом исследования служат кабели, предназначенные для передачи и распределения электрической энергии, т. е. силовые, состоящие из следующих основных конструктивных элементов: токопроводящих жил, изоляции, оболочек и защитных покровов, которые могут быть повреждены во время эксплуатации в силу различных причин.

Измерение токов, напряжений и мощности при выполнении лабораторной работы осуществляется амперметрами, ваттметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Кол-во
1	Вольтметр		0÷600 В	1
2	Вольтметр	электромагнитная	0÷250 В	1
3	Амперметр	электромагнитная	0÷300 А	2
4	Киловаттметр	электромагнитная	0÷100 кВт	1
5	Ваттметр	электродинамическая	0 – 3000 Вт	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

2. Подготовка к работе.

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 6 – 44], [3], [6].

2.2. Определить марку исследуемого кабеля и сечение токопроводящих жил. Результаты записать в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Марка кабеля	Площадь поперечного сечения жилы, мм ²	Удельное сопротивление жилы кабеля, Ом/км	Сопротивление двух жил кабеля, Ом	Длина участка кабеля, км

2.3. Составить электромонтажные схемы опытов (с учетом рис. 6.1 и рис. 6.2, а также расположения оборудования на лабораторном стенде) для экспериментального определения характера и места повреждения кабельных линий с учетом особенностей приборов применяемых для определения места повреждения

2.4. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий раздела 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

3. Рабочее задание

3.1. Собрать электромонтажную схему для измерения электрического сопротивления жил кабеля и после проверки схемы преподавателем включить питание стенда.

3.2. Измерить омическое сопротивление токопроводящих жил силового кабеля. Определить длину исследуемого кабеля и вид повреждения в силовом кабеле. Результаты записать в табл. 6.3.

Таблица 6.3

R_{AO}	R_{BO}	R_{CO}	R_{AB}	R_{BC}	R_{AC}	Вид повреждения

3.3. Собрать электромонтажную схему для определения места повреждения по схеме петли Муррея в соответствии с п. 2.3 и рис. 6.1. Для этого к зажимам « R_x » моста подключить исправную и поврежденную жилы кабеля, соединив их на противоположном конце. Переключатель (3) моста поставить в положение «ПМ». Подключить заземление к зажиму «Земля». В присутствии преподавателя включить одинарный мост Р-333.

3.4. Переключатель моста П5 установить, в зависимости от величины измеряемого сопротивления, в положение М 1000, М 100, или М10 и уравновесить мост (по нулевому показанию индикатора ЭНИ) поворотом переключателей П1 – П4, нажимая первоначально кнопки «вкл. гальв.», «грубо», а затем «точно». Результаты записать в табл. 6.4.

***ВНИМАНИЕ!** Во избежание повреждения гальванометра ЭНИ не допускается нажимать кнопку «точно» не установив стрелку гальванометра на нуль при нажатой кнопке «грубо».*

3.5. Произвести расчёт сопротивления и расстояния до места повреждения по формулам (6.3), (6.4). Результаты расчёта записать в табл.6.4.

Таблица 6.4

Петля Муррея					Петля Варлея				
r_x	L_x	r_y	L_y	ΔL	r_x	L_x	r_y	L_y	ΔL

3.6. Выполнить необходимые измерения по п.п. 3.3 – 3.4, установив перемычку на противоположном конце кабеля, оценить погрешность измерения по формуле (6.5).

3.7. Собрать электромонтажную схему для определения места повреждения по схеме петли Варлея в соответствии с п. 2.3 и схемой рис 6.2. Для этого переключатель установить в положение «ПВ». Установить на декаде П5 первоначально значение $n = 1$. Уравновесить мост поворотом переключателей П1 – П4 (по нулевому показанию индикатора ЭНИ), нажимая первоначально кнопки «вкл. гальв.», «грубо», а затем «точно».

3.8. Произвести расчёт сопротивления и расстояния до места повреждения по формулам (6.4) – (6.7). Результаты расчёта записать в табл.6.4.

3.9. Выполнить измерения по п. 3.7, установив перемычку на противоположном конце кабеля, оценить погрешность измерения по формуле (6.5). Результаты измерений записать в табл.6.4.

4. Методические указания

4.1 Методики определения целостности жил характера и места повреждения кабельных линий.

Определение целостности жил характера и места повреждения кабельных линий (в общем случае определение места повреждения ОМП) подразделяется на три основных этапа:

- диагностика повреждения, то есть определение характера повреждения кабеля. На этом этапе ОМП устанавливается необходимость предварительного прожигания;
- определение зоны предполагаемого повреждения одним из относительных методов;
- уточнение местонахождения повреждения одним из абсолютных методов.

Метод ОМП кабельной линии выбирается в зависимости от характера повреждения. Повреждения кабеля могут быть подразделены на следующие виды:

- повреждения изоляции, вызывающее замыкание одной фазы на землю;
- повреждение изоляции, вызывающее замыкание двух или трёх фаз на землю либо двух или трёх фаз между собой;
- обрыв одной, двух и трёх фаз (с заземлением или без заземления фаз);
- заплывающий пробой изоляции;
- сложные повреждения, представляющие комбинации из вышеупомянутых видов повреждений.

Для установления характера повреждения кабельной линии следует:

- измерить сопротивление изоляции каждой токоведущей жилы по отношению к земле;
- измерить сопротивление изоляции между парой токоведущих жил;
- измерить электрическое сопротивление токоведущих жил;
- определить целостность (отсутствие обрыва) токоведущих жил.

Измерения производятся на кабельной линии, которая отсоединена от источника питания и от неё отсоединены все электроприёмники.

Измерение сопротивления изоляции КЛ рекомендуется производить мегаомметром на напряжение 2500 В. Для измерения электрического сопротивления токоведущих жил могут использоваться мосты постоянного тока. В том случае, если температура окружающей среды T при измерениях отличается от 20°C, то после измерения производится пересчет сопротивления на температуру 20°C по формуле (6.1).

$$R_{20} = \frac{R_x}{1+TK\rho(T-20)}, \quad (6.1)$$

где $TK\rho$ - среднее значение температурного коэффициента удельного сопротивления.

Полученное значение сопротивления используется для определения длины исследуемого участка кабеля

$$L = \frac{RS}{k\rho}, \quad (6.2)$$

где ρ - удельное электрическое сопротивление материала, из которого изготовлена токоведущая жила;

k - коэффициент, учитывающий влияние скрутки проволок в жиле ($k = (1,02 \div 1,03)$); S - сечение жилы.

Численные значения геометрических параметров секторных алюминиевых жил кабелей напряжением 1 – 10 кВ приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Конструкция кабеля и жилы	Высота h , мм / ширина b , мм для жил сечением							
	35	50	70	95	120	150	185	240
Трехжильные однопроводные, 1 – 10 кВ	5,5	6,4	7,6	9,0	10,1	11,3	12,5	14,4
	9,2	10,5	12,5	15,0	16,6	18,4	20,7	23,8
Трехжильные многопроводные, 1 – 10 кВ	6	7,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,2	15,2
	10	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0	22,0	25,0
Четырехжильные однопроводные, 1 кВ	—	7,0	8,2	9,6	10,8	12,0	13,2	—
	—	10,0	12,0	14,1	16,0	18,0	18,0	—

После определения характера повреждения кабельной линии выбирается метод для определения места повреждения в данном конкретном случае. Рекомендуется в первую очередь определить зону, в которой расположено повреждение. Определение зоны повреждения производится одним из следующих относительных методов: импульсным (локационным), колебательного разряда (волновым) или петлевым.

В данной лабораторной определении места повреждения кабельной линии производится петлевым методом, который основан на том, что поврежденная и «исправная» жилы кабеля соединяются накоротко с одной стороны (образуется петля); с другой стороны к концам жил подсоединяются дополнительные регулируемые резисторы – создается схема моста. Для пользования методом петли необходимо иметь хотя бы одну неповрежденную жилу кабеля или хотя бы одну жилу с переходным сопротивлением, значительно превышающим переходные сопротивления двух других

жил (в 10 – 100 раз). Значения переходного сопротивления жилы должно быть не более 5000 Ом.

Методом петли надежно проверяются однофазные и двухфазные замыкания устойчивого характера. Трехфазные замыкания определяются при наличии дополнительного провода, в качестве которого может быть использован параллельно проложенный кабель.

Известны методы определения места повреждения кабеля по схеме петли Муррея и петли Варлея. Метод петли Муррея (рис 6.1) применяется, если в определенном месте одна из жил кабеля замыкается на другую или на оболочку через переходное сопротивление R_{Π} , значение которого не превышает 10^4 Ом. Для более точного определения места повреждения проводят замеры с двух концов кабеля.

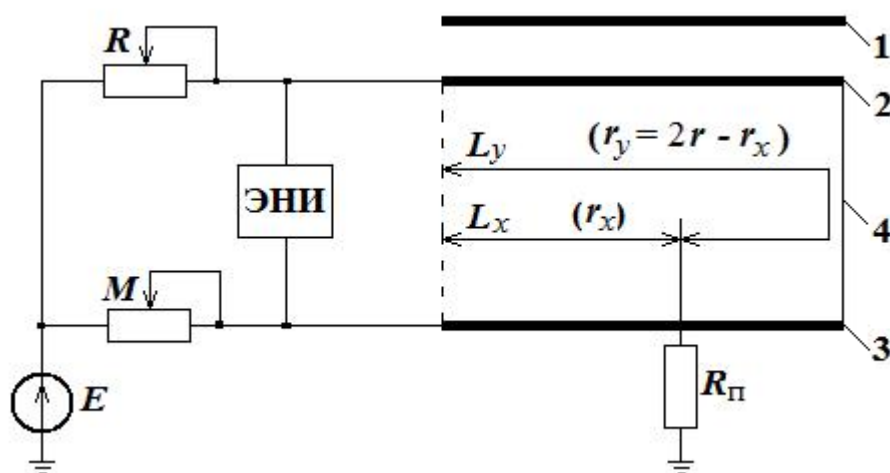


Рис.6.1. Схема измерений для определения расстояния до места повреждения кабеля методом петли Муррея: 1, 2, 3 – жилы кабеля, 4 – перемычка, R_{Π} - переходное сопротивление, ЭНИ – индикатор.

Из условия равновесия моста следует:

$$M \cdot (2r - r_x) = R \cdot r_x; \quad r_x = \frac{M \cdot 2r}{M + R}, \quad (6.3)$$

где R – сопротивление плеча моста, подключенного к неповрежденной жиле (декады П1 – П4); M – сопротивление плеча моста, подключенного к поврежденной жиле (отсчет по декаде П5 отношений m/n); r – сопротивление жилы кабеля; r_x – сопротивление жилы кабеля до места повреждения.

При постоянном сечении токоведущих жил сопротивления отрезков пропорциональны длине соответствующих участков. Расстояние до места повреждения находится из выражения

$$L_x = 2L \frac{M}{M+R}, \quad (6.4)$$

где L – длина кабельной линии.

Измерения по определению места повреждения следует производить с обоих концов кабельной линии, меняя место установки перемычки. Оценить полученные результаты можно исходя из равенства

$$L_x + L_y = 2L$$

Погрешность измерений вычисляется по формуле

$$\Delta L = \frac{2L - (L_x + L_y)}{2L} 100\%, \quad (6.5)$$

Схема измерений методом петли Варлея приведена на рис.6.2.

Результаты измерений определяются по формуле

$$r_x = \frac{n(R+r)}{n+1}, \quad (6.6)$$

где r – сопротивление двух жил кабеля, Ом;

R – сопротивление плеча сравнения (декады П1 – П4);

n – множитель, устанавливаемый на декаде моста П5.

r_1, r_2 – сопротивления декады моста П5, определяющие значения множителей m и n .

Расстояние до места повреждения кабеля находится из выражения

$$L_x = \frac{r_x}{\rho} S, \quad (6.7)$$

где S – сечение токопроводящей жилы, мм²,

ρ - удельное сопротивление материала жил кабеля, Ом мм²/км.

Измерения также следует производить с обоих концов кабельной линии, меняя место установки перемычки.

При обрыве токоведущих жил для определения мест повреждения применяется емкостной метод, основанный на измерении емкости жил по отношению друг к другу или по отношению к земле. Схема емкостного моста приведена на рис.6.3.

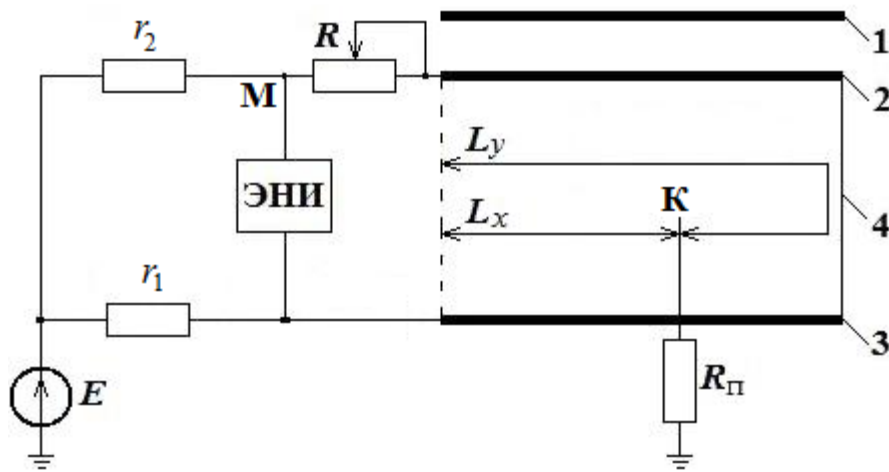


Рис.6.2. Схема измерений для определения расстояния до места повреждения кабеля методом петли Варлея: 1,2,3, - жилы кабеля, 4 – перемычка.

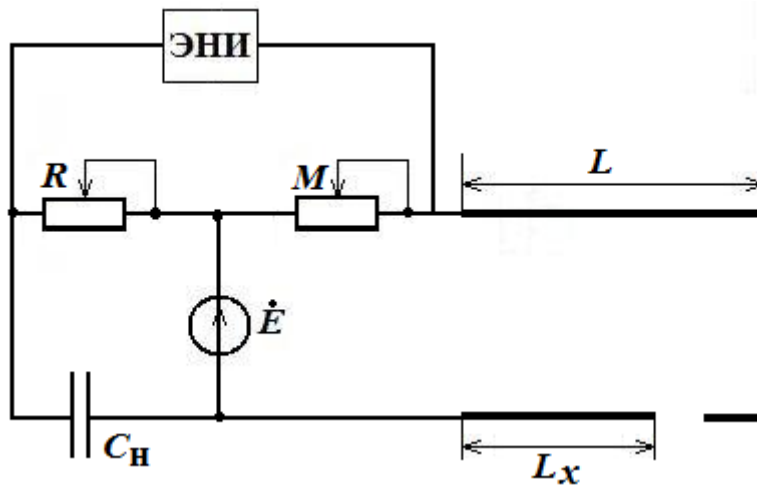


Рис.6.3. Схема измерений для определения места повреждения емкостным методом.

Из условия равновесия моста следует $C_x = C_n \frac{R}{M}$,

где M и R – регулируемые сопротивления,

C_x – определяемая емкость кабельной линии, мкФ,

C_n – емкость эталонного конденсатора, мкФ.

На основании результатов измерений емкости исправной жилы C_y и емкости поврежденной жилы C_x можно определить длину участка кабеля

$$L = \frac{C_x + C_y}{2C_{уд}}, \text{ км} \quad (5.8)$$

где $C_{уд}$ - удельная емкость.

Измерение емкости участков кабельной линии производится с обоих концов. Расстояние от места измерения до места обрыва жилы кабеля определяется из выражения

$$L_x = 2L \frac{C_2}{C_1 + C_2}, \quad (6.9)$$

где C_1 и C_2 – результаты первого и второго измерения, мкФ.

4.2. Приборы и оборудование для определения зоны повреждения кабеля

Определение зоны повреждения кабеля обычно производится с помощью специальных кабельных мостов типа КМ-61С, Р-333, или измерительных мостов ЩЗ4, Р3009, Р4056.

В данной лабораторной работе используется кабельный мост Р-333 предназначенный для измерения электрического сопротивления постоянному току в диапазоне от 0,005 Ом до 999900 Ом, а также для определения места повреждения по схемам петли Муррея (при больших сопротивлениях) и петли Варлея (при низкоомных сопротивлениях).

Внешний вид верхней панели кабельного моста типа Р-333 при измерениях по четырехпроводной (измерение низкоомных сопротивлений) и двухпроводной (измерение высокоомных сопротивлений) схемам измерений показан на рис.6.4 и рис.6.5 соответственно. На верхней панели моста Р-333 находятся:

1. Кнопки для включения мостовая схема - МВ; петля Муррея - ПМ петля Варлея - ПВ; кнопка МВ возвращает кнопки ПМ и ПВ в начальное состояние;
2. Ручки переключения сравнительного плеча и плеча отношений;
3. Кнопка для включения электронного нуля – индикатора ЭНИ;
4. Кнопка для включения питания моста;
5. Зажим для внешнего индикатора;
6. Зажимы для источника питания.
7. Зажимы проверки сопротивлений ;
8. Зажимы петли Варлея, Муррея и асимметрии проводов.

В основу определения мест повреждения методом петли положено сравнение сопротивления целой и нарушенной (без разрыва) жилы кабеля. Методом петли пользуются на кабельных линиях различных напряжений, которые смонтированы различными кабелями при замыкании одной или некоторых жил между собой и с землей в одном месте при условии, что переходное сопротивление повреждения не превышает 40 Ом и поврежденная жила не была оборвана.

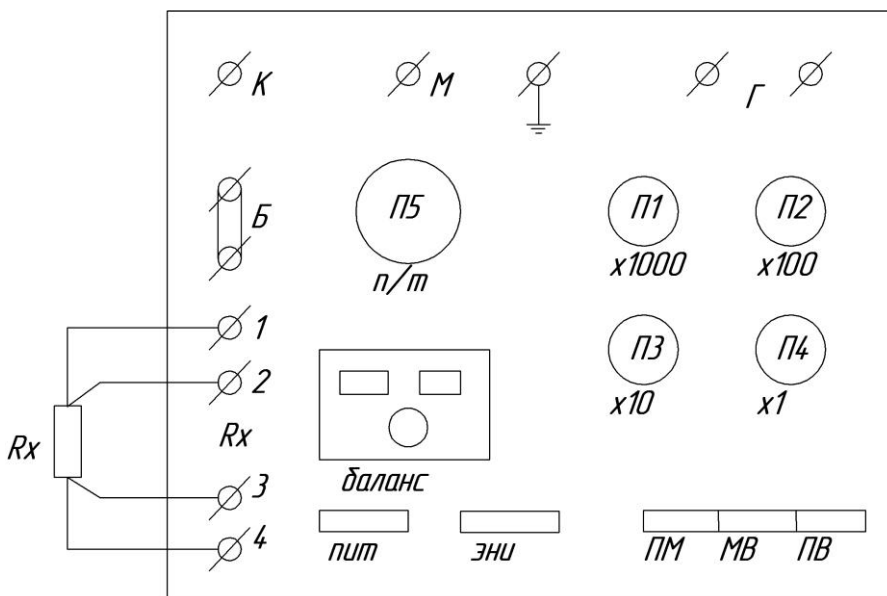


Рис. 6.4. Внешний вид верхней панели кабельного моста типа Р-333 при измерениях по четырехпроводной (измерение низкоомных сопротивлений) схеме

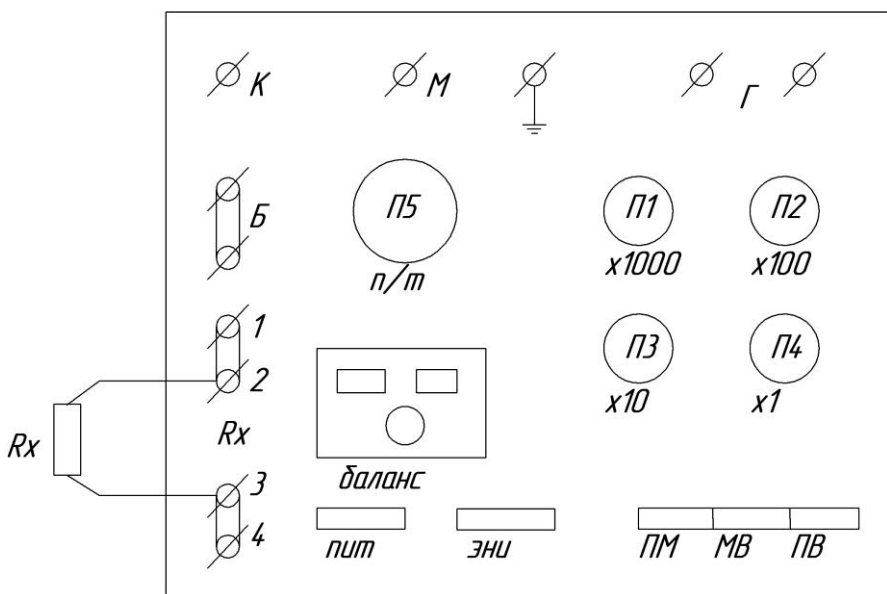


Рис. 6.5. Внешний вид верхней панели кабельного моста типа Р-333 при измерениях высокоомных сопротивлений по двухпроводной схеме

Выявление места повреждения кабеля методом петли можно выполнять также при помощи универсального моста сопротивлений МВУ-49, автоматического моста Щ-34 и кабельного моста Р-334. Автоматический мост Щ-34 используется для измерения электрического сопротивления постоянному току в диапазоне от 10^{-3} до 10^9 Ом. Предел допустимой основ-

ной погрешности в зависимости от диапазона измерений сопротивления не превышает 0,5%. Результаты измерений отображаются на цифровом табло в виде пятизначного десятичного числа с "плавающей" десятичной запятой и единицы измерения "Р", "К" и "М", где "Р" – Ом, "К" – Ком, «М» – МОм,

Прибор имеет следующие виды запуска:

- ручной, осуществляемый нажатием кнопки «Пуск», расположенной на лицевой панели;
- автоматический, с выдержкой времени после каждого измерения от 2 до 20сек. С помощью потенциометра «Время индикации», расположенного на лицевой панели;
- дистанционный, осуществляемый замыканием контактов разъема «Щ20-2», расположенного на задней панели.

Кроме кабельных мостов для определения места повреждения кабеля используются приборы, реализующие метод импульсной рефлектометрии. На основе данного метода работает серия приборов типа Р5-5, Р5-8, Р5-9, Р5-10, с помощью которых можно определить место повреждения, начиная с 1 м от начала линии (Р5-9) и относительно большим переходным сопротивлением в месте замыкания на землю (Р5-8).

Импульсный метод основан на измерении времени t_x прохождения импульса от одного конца кабельной линии до места повреждения и обратно, которое при скорости распространения этого импульса v и расстояния до места повреждения L_x определяется по формулам

$$t_x = \frac{2 \cdot L_x}{v}; \quad L_x = \frac{v \cdot t_x}{2}.$$

Скорость распространения импульса для большинства кабелей составляет 160 ± 1 м/мкс, соответственно расстояние до места повреждения можно оценить как $L_x \approx 80t_x$.

При включении прибора в кабельную линию посылаются зондирующие импульсы, которые при распространении по кабелю отражаются с изменением своих амплитудных значений и знаков в тех местах, в которых волновое сопротивление отличается от волнового сопротивления кабеля (35 Ом). Чем больше отличается сопротивление от волнового, тем больше амплитуда отраженного импульса. Причем, в месте замыкания отраженный импульс меняет знак на противоположный. По амплитуде и знаку отраженного импульса определяют как место повреждения, так и характер повреждения. Однако, из-за наличия мест ослабленной изоляции кабеля (места неоднородности), вставок, муфт и т. п., в которых сопротивления также отличаются от волнового, амплитуды отраженных импульсов могут быть сопоставимы с амплитудами отраженных импульсов от мест повреж-

дения, что усложняет идентификацию места замыкания или обрыва в кабеле. Так, например, прибором Р5-5 практически можно идентифицировать отраженный импульс от места повреждения с переходным сопротивлением, не превышающим 4 - 5-кратного значения волнового сопротивления кабеля, т. е. 150-200 Ом.

5. Порядок оформления отчета.

Отчёт составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему или эскиз макета установки, результаты измерений и расчётов, необходимые построения и выводы, а также ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Перечислите последовательность этапов проведения работ по определению места повреждения силового кабеля.
- 6.2. Перечислите возможные виды повреждения силовых кабелей.
- 6.3. Перечислите методы определения места повреждения силового кабеля и используемые при этом приборы.
- 6.4. Опишите технические характеристики кабельного моста Р-333.
- 6.5. Укажите особенности определения места повреждения силового кабеля по методу «Петли Муррея».
- 6.6. Дайте характеристику емкостного метода, используемого для определения места повреждения кабельной линии.
- 6.7. Укажите отличия определения места повреждения силового кабеля по методу «Петли Варлея» от метода «Петли Муррея».
- 6.8. Перечислите недостатки петлевых методов определения места повреждения в силовых кабелях.
- 6.9. Почему при измерении небольших значений сопротивлений используют четырехпроводную схему подключения измеряемого объекта?
- 6.10. В чем сущность измерения высокоомных сопротивлений по двухпроводной схеме?
- 6.11. Какие измерения необходимо выполнить для определения расстояния до поврежденного участка?
- 6.12. Как определить погрешность измерения расстояния до поврежденного участка?
- 6.13. Определение расстояния до места повреждения силового кабеля методом отраженного сигнала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы современной энергетики: учеб.: в 2 т. / ред. Е.В. Аметистов. 5-е изд., стер. М.: Изд-во Моск. Энергет. Ин-та, 2010. – ISSN 978-5-383. Т. 2: Современная электроэнергетика / ред. А.П. Бурман, В.А. Строев. – 2010. – 632 с.
2. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – 3-е изд., перераб. – М.: КНОРУС, 2012. – 648 с. – (для бакалавров).
3. Пантелеев Е.Г. Монтаж и ремонт кабельных линий.- М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
4. Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии.- М.: Энергоатомиздат, 1985. – 365 с.
5. Привезенцев В.А. , Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. -М.: Энергия, 1970. – 424 с.
6. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.