

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

Факультет Электротехнический
Кафедра Автоматизированные электроэнергетические системы

Заведующий кафедрой _____ Кротков Е.А.
(подпись) (ФИО)

«__» _____ 2020 г.

Выпускная квалификационная работа

Пояснительная записка
СамГТУ 13.03.02.01.13.02.12.02 ПЗ

Обучающегося Кавтаськина Максимилана Анатольевича , электротехнический факультет,
4 курс, группа №2

(фамилия, имя, отчество, факультет, курс, группа)

130302 – Электроэнергетика и электротехника,
профиль – Электроэнергетические системы и сети
(код, направление подготовки (специальности), направленность (профиль) образования)

На тему: «Эксплуатационные характеристики режимов работы кабелей 6÷220 кВ»
(полное наименование темы в соответствии с приказом об утверждении тем ВКР)

Обучающийся 4-ЭТФ-2 _____ Кавтаськин М.А.
(курс, факультет, номер группы, подпись, дата, фамилия, инициалы)

Руководитель работы профессор, д.т.н. _____ Гольдштейн В.Г.
(должность, ученая степень, звание, подпись, дата, фамилия, инициалы)

Консультант по экономике доцент, к.э.н. _____ Пронина Н.Н.
(должность, ученая степень, звание, подпись, дата, фамилия, инициалы)

Консультант по охране труда доцент, к.п.н. _____ Моссоулина Л.А.
(должность, ученая степень, звание, подпись, дата, фамилия, инициалы)

Нормоконтролер доцент, к.т.н. _____ Гудков А.В.
(должность, ученая степень, звание, подпись, дата, фамилия, инициалы)

Самара 2020 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»

Электротехнический факультет
Кафедра «Автоматизированные электроэнергетические системы»

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПОЛНЕНИЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

СамГТУ 130302.01.13.02.012.01 ТЗ

Студенту Кавтаськину Максимилиану Анатольевичу, 4-ЭТФ-2

(фамилия, имя, отчество, курс, факультет, группа)

Вид работы: бакалаврская работа

Тема: Эксплуатационные характеристики режимов работы кабелей 6-220 кВ

(полное название темы квалификационной работы в соответствии с приказом об утверждении тематики ВКР)

Перечень подлежащих исследованию, разработке, проектированию вопросов по базовой части работы:

Наименование вопроса	Результаты освоения ОПОП
1. Вводная часть	ДПК-1, ОПК-1, ОК-7, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4
2. Режимы эксплуатации кабелей с изоляцией из СПЭ	ДПК-1, ОПК-1, ОК-7, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4
3. Расчеты режимов работы КПИ 6 ÷ 35 кВ	ДПК-1, ОПК-1, ОК-7, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4
4. Расчеты режимов работы КПИ 110 ÷ 220 кВ	ДПК-1, ОПК-1, ОК-7, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4
5. Исследование результатов	ДПК-1, ОПК-1, ОК-7, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4

Перечень запланированных образовательной программой результатов обучения:

Компетенция	Расшифровка компетенции
ДПК-1	Готовность с помощью расчетов и измерений определять параметры и осваивать новое оборудование объектов профессиональной деятельности (научно-исследовательской деятельности).
ОПК-1	Способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий.
ОК-7	Способность работать в коллективе, толерантно воспринимать социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия.
ПК-1	Способность участвовать в планировании, подготовке и выполнении типовых экспериментальных исследований по заданной методике.
ПК-2	Способность обрабатывать результаты эксперимента.
ПК-3	Способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования.
ПК-4	Способность производить обоснование проектных решений.

Перечень презентационного материала – 11 стр. А1

Консультанты по разделам ВКР:

1. Консультант по экономике доцент, к.э.н. Пронина НН
2. Консультант по охране труда доцент, к.п.н. Моссоулина Л.А.

Нормоконтролер доцент, к.т.н. Гудков А.В.

Дата выдачи задания: « ____ » _____ 2020 г.

Задание согласовано и принято к исполнению.

Руководитель

Гольдштейн В.Г.

(Фамилия И.О.)

д.т.н., профессор

(уч.степень, уч.звание)

(подпись, дата)

Студент

Кавтаськин М.А.

(Фамилия И.О.)

4-ЭТФ-2

(курс, факультет, группа)

(подпись, дата)

Тема утверждена приказом СамГТУ № _____ от « ____ » _____ 2020 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа выполнена на тему: «Эксплуатационные характеристики режимов работы кабелей 6-220 кВ».

Объем выпускной квалификационной работы составляет 71 лист формата А4 и содержит: 54 листа основного текста, 27 иллюстраций, 23 таблицы, 15 приложений и списка использованных источников из 12 работ.

Графическая часть работы представлена в виде презентации и выполнена на 11 листах А1.

Ключевые слова: кабельная линия, кабели с полимерной изоляцией, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, симметричные и несимметричные режимы работы кабелей.

Объект исследования – методика расчета токов и напряжений экранов одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Цель работы – исследование характеристик режимов работы кабелей с изоляцией из СПЭ в сетях напряжением 6 ÷ 220 кВ.

Задачи исследования:

- 1) определение режимов эксплуатации кабелей с изоляцией из СПЭ;
- 2) рассмотрение симметричных и несимметричных режимов работы кабелей;
- 3) проведение анализа основных расчетных случаев для определения напряжения на экране кабелей;
- 4) расчет зависимости напряжения на экране кабеля от сечения жилы и от расстояния между кабелями фаз при одностороннем заземлении экрана;
- 5) расчет напряжений и токов экранов кабелей;
- 6) сбор технических характеристик (фирмы АВВ-Москабель), расчет основных параметров кабелей 6 ÷ 220 кВ и составление приложения.

Результаты работы предназначены для облегчения расчета токов и напряжений на экранах кабельных линий по приведенным графикам и составленному приложению.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. РЕЖИМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СПЭ	5
1.1. Рассмотрение однофазной сети с применением комплексного метода	7
1.2. Рассмотрение трехфазной группы однофазных кабелей.....	10
2. РАСЧЕТЫ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КАБЕЛЕЙ С ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ 6 ÷ 35 кВ.....	13
2.1. Симметричные и несимметричные режимы работы кабелей 6 ÷ 35 кВ	13
2.2. Основные расчетные режимы кабелей с полимерной изоляцией в сетях с изолированной нейтралью	19
2.3. Однофазное короткое замыкание на землю в сетях 6 ÷ 35 кВ.....	21
2.4. Расчет напряжений экранов кабелей 6 ÷ 35 кВ	22
2.5. Расчет экрана кабелей 6-35 кВ с изоляцией из СПЭ.....	24
2.6. Обобщающие расчеты для кабелей 6-35 кВ	27
2.6.1. Расчет напряжений экранов кабелей.....	30
2.6.2. Расчет доли токов в экранах кабелей	35
3. РАСЧЕТЫ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КПИ 110 ÷ 220 кВ.....	39
3.1. Симметричные и несимметричные режимы работы кабелей 110 ÷ 220 кВ	39
3.2. Основные расчетные случаи кабелей в сетях 110 ÷ 220 кВ	40
3.3. Расчет напряжений экранов и определение конструкций экранов кабелей 110 ÷ 220 кВ с изоляцией из СПЭ	43
4. БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ: Обеспечение безопасности при прокладке и эксплуатации кабельных линий.....	45
4.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов при эксплуатации и ремонте кабельных линий	45
4.2. Мероприятия, обеспечивающие защиту от опасностей	46
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	53
ПРИЛОЖЕНИЕ	54

ВВЕДЕНИЕ

Кабельные сети составляют важную часть современных распределительных сетей и систем электроснабжения. Наибольшее применение кабельные линии (КЛ) нашли именно при передаче и распределении электроэнергии (ЭЭ) на промышленных предприятиях и в крупных городах, где наблюдается повышенная плотность нагрузки электропотребления, а также при передаче ЭЭ через большие водные пространства. В круг потребителей кабельно-проводниковой продукции входят предприятия различных отраслей промышленности, таких как энергетика, металлургическая отрасль, угольно-добывающая отрасль, нефтегазовая отрасль, машиностроение, строительная индустрия и другие отрасли промышленности.

В настоящее время в сетях 6 ÷ 220 кВ активно используются однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Ввиду роста требований эксплуатирующих организаций к техническим характеристикам кабелей становится очевидна устойчивость процесса замены традиционной твердой изоляции на более перспективные виды полимерной изоляции (КПИ). Основными преимуществами таких кабелей является: бóльшая пропускная способность при передаче потока мощности с меньшим сечением, а соответственно, меньшие габариты и геометрические характеристики; повышенная прочность; повышенные значения длительно допустимых температур нагрева жил; длительный срок службы; экологическая безопасность.

Данный вид кабеля имеет особенность конструкции, заключающуюся в наличии медного экрана, который выполняется в виде ленты или проволок, становясь тем самым дополнительным слоем кабеля. Экран служит для устранения/выравнивания электрического поля вокруг кабеля, воздействующего на изоляцию кабеля «жила-экран», поэтому важным вопросом является выбор верного способа заземления экрана.

Однако существует нежелательное явление индуктивного характера, которое заключается в протекании токов в экранах кабелей близких к

рабочим, когда экран заземляется с двух сторон КЛ. Ток, текущий по токопроводящей жиле, создает переменное магнитное поле, которое впоследствии взаимной индукции между жилой и экраном индуцирует ЭДС в экране. Также появление токов в экранах и напряжение на экранах может появиться при повреждении изоляции кабеля. Протекание тока в экране кабеля близкого по значению к току жилы приводит к возникновению активных потерь, что может привести к нагреву и последующему нарушению изоляции кабеля. Основными способами устранения индуцированных токов по экрану является применение одностороннего заземления экранов и электромагнитная компенсация с применением транспозиции экранов.

Можно сделать вывод о том, что эксплуатационными характеристиками кабелей с изоляцией из СПЭ являются токи, проходящие по жилам и экранам, а также напряжения, наводимые на экранах кабелей при разных режимах работы. Стоит отметить, что такими режимами являются нормальный режим работы и аварийный режим, представляющий наибольшую опасность для системы.

Актуальность исследования – целью предприятий-производителей кабельной продукции является внедрение новейших технологий в области производства, что приводит к модернизации продукции, а впоследствии к изменению их технических, геометрических и электрических параметров.

Теоретико-методологическая часть – комплексный метод расчета цепей переменного тока, метод симметричных составляющих, методика расчета токов и напряжений в экранах одножильных кабелей.

Практическая значимость исследования – проведение расчетов и составление приложения может способствовать упрощению проектирования кабельных сетей.

1. РЕЖИМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СПЭ

Для начала следует более подробно изучить появление токов в заземленных экранах кабелей с изоляцией из СПЭ, обратимся к рис. 1.1, на котором изображена однофазная сеть. Данная сеть включает в себя: источник питания, представленный источником ЭДС E ; сам кабель, по которому протекает ток; нагрузку Z_H . На рисунке показано, что экран заземлен с двух сторон – со стороны источника питания (ИП) и со стороны нагрузки Z_H или другими словами в начале и в конце кабеля. Значение h_k показывает, на какой высоте относительно поверхности земли находится кабель. По схеме кабель представляет из себя линию жилы, по которой протекает ток $I_{жс}$, и линию экрана. Ток $I_{жс}$, пройдя через нагрузку Z_H , должен вернуться в источник E и для этого у него есть два пути: пройти по экрану I_3 или пройти по толще земли, ток проходящий в земле можно вычислить по первому закону Кирхгофа, который гласит, что сумма втекающих токов в узел равна сумме вытекающих из узла: $I_3 = I_{жс} - I_3$.

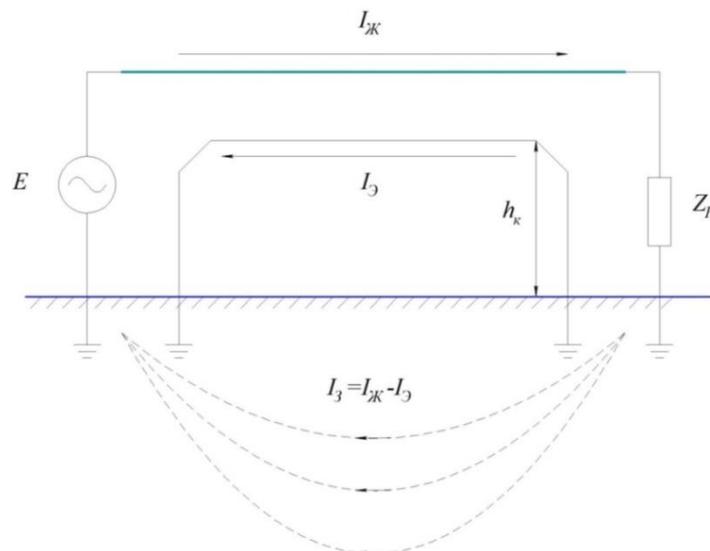


Рис. 1.1. Однофазная сеть, включающая источник, кабель и нагрузку.

Стоит отметить, что ток в земле I_3 , возвращаясь в ИП, может протекать как на небольшой глубине, так и на значительной, доходя до сотен метров. При этом принимают, что этот ток I_3 , распределенный на разной глубине земли, протекает на одной определенной глубине и эта глубина рассчитывается по формуле:

$$D_3 = 2,24 \cdot \sqrt{\frac{\rho_3}{\omega \cdot \mu_0}},$$

где ρ_3 – удельное сопротивление грунта, [Ом·м];

$\omega=2\pi f$ – угловая частота, [рад/с];

f – частота переменного тока, [Гц];

μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость, которая в технических расчетах принимается постоянной величиной: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, [Гн/м].

Исходя из данной формулы, можно сделать вывод о том, что уменьшение эквивалентной глубины протекания тока D_3 возможно только при уменьшении удельного сопротивления грунта ρ_3 и при увеличении частоты тока f . Тем самым более заметным будет становиться поверхностный эффект, при котором линии тока I_3 будут подниматься выше к поверхности земли.

При значениях $\rho_3 = 100 \div 1000$ Ом·м и при промышленной частоте $f = 50$ Гц значения эквивалентной глубины D_3 составляют от тысячи до нескольких тысяч метров, что существенно превышает высоту нахождения (подвеса) кабеля относительно земли h_k . Это можно подтвердить, приведя простой график зависимости D_3 от ρ_3 на рис. 1.2:

Таблица 1.1
Зависимость эквивалентной глубины протекания тока в толще земли от удельного сопротивления грунта.

ρ_3 , Ом·м	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
D_3 , м	1127	1594	1953	2255	2521	2761	2983	3189	3382	3565

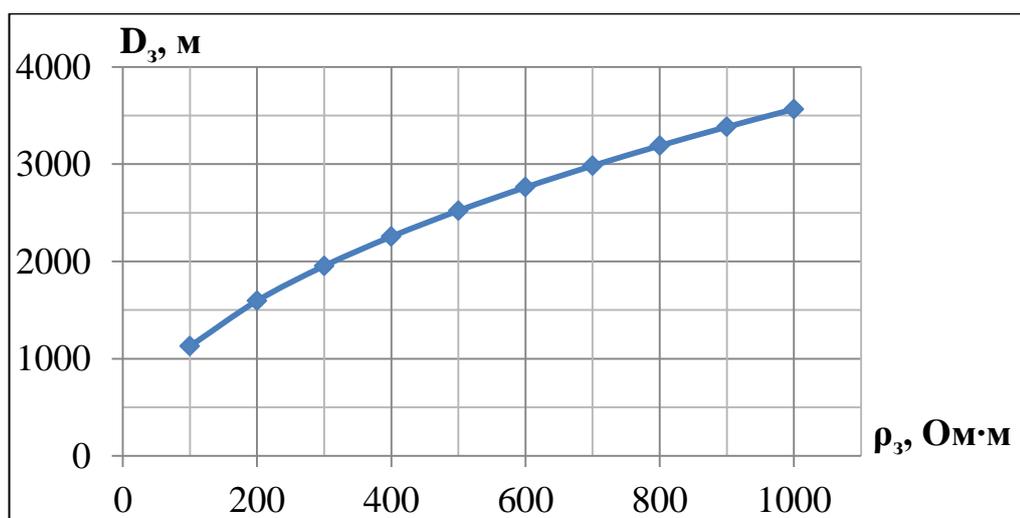


Рис. 1.2. Зависимость эквивалентной глубины от удельного сопротивления грунта.

Стоит отметить, что расположение кабеля относительно земли, то есть, будь он над землей, как это показано на рис. 1.1 (на эстакаде, в лотке), или проложен в земле (в кабельном канале, в полиэтиленовой трубе), большого

значения не имеет и в любом случае расстояние от кабеля до поверхности земли h_k будет существенно меньше глубины протекания тока в грунте D_3 .

Таким образом, токи и напряжения в кабеле на промышленной частоте не зависят от того, размещен ли кабель над землей или в земле. Будем считать, что кабель размещен над землей, и для его расчета пользуемся формулами теории воздушных линий электропередач, т.е. принимаем один кабель двухпроводной линией (жила и экран), несколько других кабелей - многопроводной. Емкость кабеля, разумеется, вычисляется с учетом того, лежит ли моделируемый кабель в земле или над землей.

1.1. Рассмотрение однофазной сети с применением комплексного метода

Однофазную сеть, указанную на рис. 1.1, с протекающими токами в жиле, экране и земле, можно представить как два условных контура рис. 1.3: первый контур образован жилой кабеля и обратным проводом, залегающим в земле на глубине D_3 ; второй контур образован экраном кабеля и тем же самым обратным проводом, залегающим на глубине D_3 . Таким образом, процессы в однофазном кабеле могут быть пояснены как результат взаимодействия этих двух контуров.

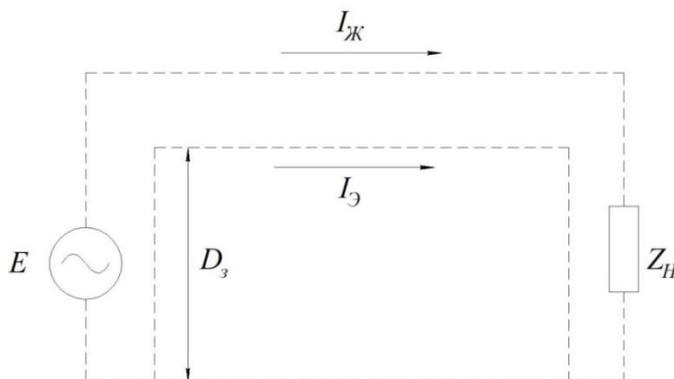


Рис. 1.3. Однофазная сеть с указанными условными контурами токов.

Когда сеть работает в установившемся или квазиустановившемся режиме, тогда токи и напряжения в кабеле имеют синусоидальный характер с промышленной частотой $f = 50$ Гц. В этом случае удобно воспользоваться комплексным методом расчета цепей переменного тока, представив токи и напряжения в виде системы векторов, вращающихся с радиальной частотой $\omega = 2\pi f$. Таким образом, можно записать следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_ж &= \dot{Z}_ж \cdot \dot{I}_ж + \dot{Z}_{жэ} \cdot \dot{I}_э \\ \Delta \dot{U}_э &= \dot{Z}_э \cdot \dot{I}_э + \dot{Z}_{жэ} \cdot \dot{I}_ж \end{aligned}$$

где $\Delta\dot{U}_{\text{ж}} = \dot{E} - \dot{Z}_{\text{н}} \cdot \dot{I}_{\text{ж}}$ – продольное падение напряжения на жиле, [В];

$\Delta\dot{U}_{\text{э}}$ – продольное падение напряжения на экране, [В];

$\dot{Z}_{\text{ж}} = R_3 + R_{\text{ж}} + j\omega L_{\text{ж}}$ – собственное погонное сопротивление жилы, [Ом/м];

$\dot{Z}_{\text{э}} = R_3 + R_{\text{э}} + j\omega L_{\text{э}}$ – собственное погонное сопротивление экрана, [Ом/м];

$\dot{Z}_{\text{жэ}} = R_3 + j\omega M_{\text{жэ}}$ – взаимное погонное сопротивление между жилой и экраном кабеля, [Ом/м];

$R_{\text{ж}}, R_{\text{э}}, R_3$ – активные сопротивления, соответственно, жилы, экрана и земли, [Ом/м];

$L_{\text{ж}}, L_{\text{э}}$ – собственные индуктивности жилы и экрана, соответственно, [Гн/м];

$M_{\text{жэ}}$ – взаимная индуктивность между жилой и экраном кабеля, [Гн/м].

В случае, когда экран заземлен с двух сторон, как показано на рис. 1.1, падение напряжения на экране будет отсутствовать и тогда можно совершить ряд преобразований:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_{\text{э}} &= 0, \\ \dot{Z}_{\text{э}} \cdot \dot{I}_{\text{э}} + \dot{Z}_{\text{жэ}} \cdot \dot{I}_{\text{ж}} &= 0, \\ \dot{Z}_{\text{э}} \cdot \dot{I}_{\text{э}} &= -\dot{Z}_{\text{жэ}} \cdot \dot{I}_{\text{ж}}, \\ \frac{\dot{I}_{\text{э}}}{\dot{I}_{\text{ж}}} &= -\frac{\dot{Z}_{\text{жэ}}}{\dot{Z}_{\text{э}}},\end{aligned}$$

исходя из вышеуказанных формул собственных и взаимных продольных погонных сопротивлений кабелей, получается следующее отношение:

$$\frac{\dot{I}_{\text{э}}}{\dot{I}_{\text{ж}}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{жэ}}}{\dot{Z}_{\text{э}}} = -\frac{R_3 + j\omega M_{\text{жэ}}}{R_3 + R_{\text{э}} + j\omega L_{\text{э}}}.$$

На данном этапе следует обратиться к теории воздушных линий, а именно к методике расчета токов и напряжений в экранах одножильных кабелей. Исходя из этой методики, собственная индуктивность экрана $L_{\text{э}}$ и взаимная индуктивность между жилой и экраном кабеля $M_{\text{жэ}}$ равны между собой:

$$L_{\text{э}} = M_{\text{жэ}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{r_2}\right),$$

где r_2 – внутренний радиус экрана кабеля.

Если вернуться к отношению комплексных значений тока, протекающего по экрану, и тока, протекающего по жиле, учитывая равенство

индуктивностей $L_{\text{э}}$ и $M_{\text{жэ}}$, получается, что числитель и знаменатель отличаются только наличием активного сопротивления экрана $R_{\text{э}}$ в знаменателе. Значит можно сделать вывод, что отношение токов $|\dot{I}_{\text{э}}/\dot{I}_{\text{ж}}| < 1$ и, чем меньше активное сопротивление экрана $R_{\text{э}}$, тем ближе это отношение к единице для случая, когда экран заземлен со стороны источника и нагрузки. Отметим, что для медных экранов ток в экране оказывается сопоставимым с током в жиле.

Рассмотрим случай, когда *экран заземлен только с одной стороны*. В таком случае комплексное значение тока экрана приравнивается к нулю, а падение напряжения на экране является напряжением незаземленного конца экрана относительно земли:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{э}} &= 0, \\ \Delta \dot{U}_{\text{э}} &= \dot{Z}_{\text{жэ}} \cdot \dot{I}_{\text{ж}}, \end{aligned}$$

при этом сопротивление можно представить как:

$$\dot{Z}_{\text{жэ}} = \dot{Z}_{\text{жэ}}^* \cdot l_{\text{к}},$$

где $\dot{Z}_{\text{жэ}}^*$ – погонное взаимное сопротивление кабеля, [Ом/м];

$l_{\text{к}}$ – длина исследуемого кабеля, [м].

Исходя из этого, в случае одностороннего заземления экрана падение напряжения на экране или напряжение незаземленного конца экрана относительно земли является пропорциональным длине кабеля $l_{\text{к}}$ и току $\dot{I}_{\text{ж}}$, протекающему в токопроводящей жиле. Следует отметить, что ток в жиле принимается как для нормального режима, так и для режима короткого замыкания (КЗ). В нормальном режиме этим током является ток нагрузки, который, как правило, составляет десятки-сотни ампер. При однофазном или трехфазном коротком замыкании за ток в жиле принимают периодическую составляющую тока, проходящего через исследуемый кабель в точку повреждения изоляции сети, находящуюся вне кабеля, в случае аварии значения тока могут достигать тысяч Ампер. Таким образом, становится понятно, что именно при аварийных режимах работы сети, а именно при КЗ в сети вне кабеля, когда по жиле кратковременно протекают наибольшие токи, и при нагрузке, стремящейся к нулю $Z_{\text{н}} \approx 0$, токи и напряжения на экране будут принимать наибольшие значения.

Подводя итог вышесказанного: *методика расчета токов и напряжений* должна включать в себя рассмотрение нормального и аварийного режима работы сети (однофазное, трехфазное и другие виды повреждения изоляции сети вне кабеля).

1.2. Рассмотрение трехфазной группы однофазных кабелей

Как правило, на практике применяется не просто однофазный кабель, а трехфазная группа однофазных кабелей, что следует также рассмотреть, поскольку в таком случае на токи и напряжения в экране каждой фазы будет влиять не только ток жилы этой фазы, но и токи жил и экранов соседних фаз. Отметим особенность однофазных кабелей с заземленным экраном: за его пределами отсутствует электрическое поле, однако магнитные поля трех однофазных кабелей, входящих в трехфазную группу, в нормальном режиме дают наводки на контуры, образованные тремя экранами. Рассмотрим случай расположения однофазных кабелей в вершинах равностороннего треугольника (*TF*) на рис. 1.4, где указаны внутренний радиус экрана кабеля r_2 и эквивалентное расстояние между осями соседних фаз S .

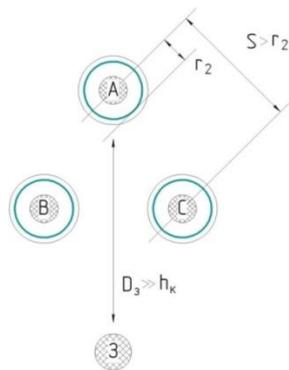


Рис. 1.4. Группа из трех однофазных кабелей с расположением в вершинах равностороннего треугольника *TF*.

$$r_2 = r_1 + \Delta_{жэ},$$

$$S = d_{AB} = d_{AC} = d_{BC} \text{ (тип } TF),$$

где r_1 – внешний радиус жилы кабеля, [мм];

$\Delta_{жэ}$ – толщина изоляции кабеля, [мм];

d_{AB}, d_{AC}, d_{BC} – расстояние между центрами жил кабелей, [мм].

Аналогично примеру с однофазным кабелем воспользуемся *комплексным методом* и запишем уравнения падений напряжения в жилах и в экранах для трех фаз с учетом воздействия, которое оказывают соседние кабели:

$$\Delta \dot{U}_{жА} = \dot{Z}_{ж} \cdot \dot{I}_{жА} + \dot{Z}_{жэ} \cdot \dot{I}_{эА} + \dot{Z}_{к} \cdot (\dot{I}_{жВ} + \dot{I}_{эВ}) + \dot{Z}_{к} \cdot (\dot{I}_{жС} + \dot{I}_{эС}),$$

$$\Delta \dot{U}_{эА} = \dot{Z}_{э} \cdot \dot{I}_{эА} + \dot{Z}_{жэ} \cdot \dot{I}_{жА} + \dot{Z}_{к} \cdot (\dot{I}_{жВ} + \dot{I}_{эВ}) + \dot{Z}_{к} \cdot (\dot{I}_{жС} + \dot{I}_{эС}),$$

$$\Delta \dot{U}_{жВ} = \dot{Z}_{ж} \cdot \dot{I}_{жВ} + \dot{Z}_{жэ} \cdot \dot{I}_{эВ} + \dot{Z}_{к} \cdot (\dot{I}_{жА} + \dot{I}_{эА}) + \dot{Z}_{к} \cdot (\dot{I}_{жС} + \dot{I}_{эС}),$$

$$\Delta \dot{U}_{эВ} = \dot{Z}_{э} \cdot \dot{I}_{эВ} + \dot{Z}_{жэ} \cdot \dot{I}_{жВ} + \dot{Z}_{к} \cdot (\dot{I}_{жА} + \dot{I}_{эА}) + \dot{Z}_{к} \cdot (\dot{I}_{жС} + \dot{I}_{эС}),$$

$$\Delta \dot{U}_{\text{жС}} = \dot{Z}_{\text{ж}} \cdot \dot{I}_{\text{жС}} + \dot{Z}_{\text{жэ}} \cdot \dot{I}_{\text{эС}} + \dot{Z}_{\text{к}} \cdot (\dot{I}_{\text{жВ}} + \dot{I}_{\text{эВ}}) + \dot{Z}_{\text{к}} \cdot (\dot{I}_{\text{жА}} + \dot{I}_{\text{эА}}),$$

$$\Delta \dot{U}_{\text{эС}} = \dot{Z}_{\text{э}} \cdot \dot{I}_{\text{эС}} + \dot{Z}_{\text{жэ}} \cdot \dot{I}_{\text{жС}} + \dot{Z}_{\text{к}} \cdot (\dot{I}_{\text{жВ}} + \dot{I}_{\text{эВ}}) + \dot{Z}_{\text{к}} \cdot (\dot{I}_{\text{жА}} + \dot{I}_{\text{эА}}),$$

где $\dot{Z}_{\text{к}} = R_{\text{з}} + j\omega M_{\text{к}}$ – взаимное погонное сопротивление жилы (экрана) и соседнего кабеля, [Ом/м];

$M_{\text{к}}$ – взаимная индуктивность между жилой и соседним кабелем, [Гн/м].

Из отношения тока экрана к току жилы получается $\dot{I}_{\text{э}} \approx -\dot{I}_{\text{ж}}$, что говорит о том, что сумма тока жилы и тока экрана приблизительно равняется нулю. Запишем уравнения падений напряжений в жиле и экране фазы «А»:

$$\dot{I}_{\text{жВ}} + \dot{I}_{\text{эВ}} \approx 0,$$

$$\dot{I}_{\text{жС}} + \dot{I}_{\text{эС}} \approx 0,$$

$$\Delta \dot{U}_{\text{жА}} \approx \dot{Z}_{\text{ж}} \cdot \dot{I}_{\text{жА}} + \dot{Z}_{\text{жэ}} \cdot \dot{I}_{\text{эА}},$$

$$\Delta \dot{U}_{\text{эА}} \approx \dot{Z}_{\text{э}} \cdot \dot{I}_{\text{эА}} + \dot{Z}_{\text{жэ}} \cdot \dot{I}_{\text{жА}},$$

то есть влияние фаз «В» и «С» недостаточное для компенсации влияния тока жилы фазы «А» на ток экрана фазы «А», поскольку ток жилы имеет большее влияние на ток экрана. Следовательно, процесс возникновения токов в экранах кабеля представленный для однофазной сети справедлив и для группы из трех однофазных кабелей.

Разберем симметричный режим трехфазной группы кабелей, при котором трехфазные системы токов и напряжений симметричны. При таком режиме токи экрана трехфазной группы кабелей будут отсутствовать, при условии, что *экран заземлен по концам*.

Сумма токов протекающих по жилам трех фаз будет равна нулю (условие симметрии):

$$\dot{I}_{\text{жА}} + \dot{I}_{\text{жВ}} + \dot{I}_{\text{жС}} = 0.$$

Падение напряжения на экране фазы «А», с учетом отсутствия токов, протекающих в экранах, будет записываться следующим образом:

$$\Delta \dot{U}_{\text{эА}} = \dot{Z}_{\text{жэ}} \cdot \dot{I}_{\text{жА}} + \dot{Z}_{\text{к}} \cdot \dot{I}_{\text{жВ}} + \dot{Z}_{\text{к}} \cdot \dot{I}_{\text{жС}} = 0,$$

причем это справедливо лишь в случае равенства сопротивлений $\dot{Z}_{\text{жэ}} = \dot{Z}_{\text{к}}$. Иначе говоря, ток в экране фазы «А» мог бы быть компенсирован действием фаз «В» и «С», если бы они имели такое же влияние, как ток жилы фазы «А» на данный ток экрана, в конечном счете, их влияния не достаточно.

Исходя из методики расчета токов и напряжений в экранах одножильных кабелей, имеем:

$$M_{\text{жэ}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{r_2}\right),$$

$$M_{\text{к}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{S}\right).$$

Различие данных формул заключается лишь в значениях знаменателя под знаком логарифма и поскольку имеет место быть неравенство $S > r_2$, т.е. расстояние между фазами кабеля больше внутреннего радиуса экрана кабеля, исходя из этого:

$$M_{\text{жэ}} > M_{\text{к}}, \quad \dot{Z}_{\text{жэ}} > \dot{Z}_{\text{к}}.$$

Это в очередной раз доказывает, что соседние фазы исследуемой фазы не способны компенсировать ток, протекающий в экране, данной исследуемой фазы. Даже если предпринять попытку и приблизить вплотную кабели фаз друг к другу, тем самым уменьшая S , то максимум чего можно добиться $S \approx r_2$, что в любом случае не изменит неравенство взаимных индуктивностей.

Таким образом, токи и напряжения в экранах группы однофазных кабелей находятся в прямой зависимости от расстояния между кабелями, при увеличении этого расстояния значения токов и напряжений увеличивается и наоборот. Отметим, что сближение кабелей вплотную друг к другу нецелесообразно, исходя из вопросов эффективности охлаждения кабеля. Поэтому для всех типовых трехфазных групп свойственны значительные величины токов и напряжений в экранах кабелей.

Появление нежелательных характеристик в экранах можно было бы избежать в случае применения трехфазного кабеля, который состоит из трех жил в одной оболочке. Но в силу ряда преимуществ применения однофазных кабелей СПЭ выбор, как правило, падает именно на их эксплуатацию, поэтому появляется повышенное внимание к токам и напряжениям в их экранах. К таким преимуществам относятся: отсутствие ограничений на сечение жилы, более лучшая гибкость, высокая надежность, удобство монтажа и ремонта.

2. РАСЧЕТЫ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КАБЕЛЕЙ С ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ 6 ÷ 35 кВ

2.1. Симметричные и несимметричные режимы работы кабелей 6 ÷ 35 кВ

Повышенные значения величин токов, протекающих в жилах однофазных кабелей 6 ÷ 35 кВ, могут быть в симметричных и несимметричных режимах работы, они, как было выяснено в предыдущей главе, создают соответствующие токи и напряжения в экранах кабелей. Проведем анализ возникающих процессов и воспользуемся расчетной схемой сети, которая содержит кабельную линию рис. 2.1. На рисунке представлены две «системы», соединенные кабельной линией (КЛ). Первая система, подсоединенная к кабелю в начале, является питающей сетью со значениями ЭДС E' и сопротивления Z' , а под системой, присоединенной в конце, можно считать нагрузку с соответствующими значениями E'' и Z'' .

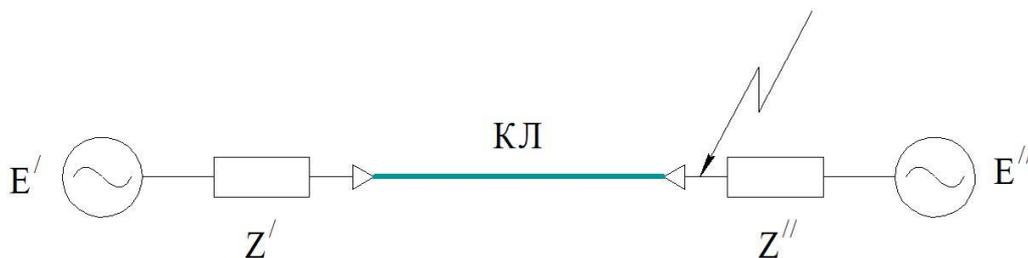


Рис. 2.1. Расчетная схема сети

В ходе анализа нарушения симметричной работы в системе необходимо пользоваться *методом симметричных составляющих*, где используются понятия прямой, обратной и нулевой последовательности. Рассмотрим параметры кабеля и примыкающих к нему систем, которые используются в расчете режимов. В расчете учитываются активные и реактивные сопротивления, при этом сопротивления прямой и обратной последовательности равны.

Сопротивления отдельно левой и отдельно правой систем могут быть определены с учетом мощности короткого замыкания (КЗ) каждой из систем, способа заземления нейтрали сети, наличия трансформаторов и токоограничивающих реакторов, наличия и характера нагрузки, а для кабеля принимаются в зависимости от способа соединения его экранов. Покажем расчетные уравнения сопротивлений элементов схемы в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Сопровитвления составляющих элементов расчетной схемы сети.

Элемент схемы	Прямая последовательность	Обратная последовательность	Нулевая последовательность
«Питающая сеть»	$\dot{Z}'_1 = R'_1 + jX'_1$	$\dot{Z}'_2 = \dot{Z}'_1$	$\dot{Z}'_0 = R'_0 + jX'_0$
Трехфазная группа однофазных кабелей	$\dot{Z}_1 = \dot{Z}'_1 \cdot L_k$	$\dot{Z}_2 = \dot{Z}_1$	$\dot{Z}_0 = \dot{Z}'_0 \cdot L_k$
«Нагрузка»	$\dot{Z}''_1 = R''_1 + jX''_1$	$\dot{Z}''_2 = \dot{Z}''_1$	$\dot{Z}''_0 = R''_0 + jX''_0$

ЭДС «питающей сети» E' , зависящая от характера нагрузки, рассчитывается как действующее значение фазного напряжения сети:

$$E' = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}},$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети.

Рассмотрим симметричный и несимметричный режимы работы схемы рис. 2.1. *Симметричными режимами* являются нормальный режим работы и случай трехфазного КЗ $K^{(3)}$. При расчете симметричных КЗ необходимо принять допущение о сохранении симметрии трехфазной системы. Запишем в табл. 2.2 уравнения токов, протекающих по жиле кабеля, каждой из фаз в нормальном режиме работы и в случае $K^{(3)}$, возникшем в сети непосредственно за кабелем, как показано на рис. 2.1, что говорит об отсутствии в расчетах ЭДС E'' и сопротивления нагрузки Z'' .

Таблица 2.2

Токи в жилах фаз «А», «В», «С» для симметричных режимов.

Режим работы	Фаза «А»	Фаза «В»	Фаза «С»
Нормальный режим	$i_{\text{жА}} = \frac{\dot{E}' - \dot{E}''}{\dot{Z}'_1 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}''_1}$	$i_{\text{жВ}} = a^2 \cdot i_{\text{жА}}$	$i_{\text{жС}} = a \cdot i_{\text{жА}}$
Трехфазное короткое замыкание	$i_{\text{жА}} = \frac{\dot{E}'}{\dot{Z}'_1 + \dot{Z}_1}$	$i_{\text{жВ}} = a^2 \cdot i_{\text{жА}}$	$i_{\text{жС}} = a \cdot i_{\text{жА}}$

При симметричном режиме работы сумма токов фаз будет равна нулю:

$$i_{\text{жА}} + i_{\text{жВ}} + i_{\text{жС}} = 0.$$

Для уравнений токов в жилах используется операторная форма записи, которая подразумевает, что умножение вектора тока на коэффициент a равносильно повороту вектора против часовой стрелки на 120° :

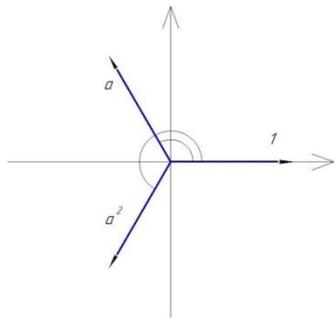


Рис. 2.2. Симметричная система единичных векторов

$$a = 1 \cdot j120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$a^2 = 1 \cdot j240^\circ = a^{-j120} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$a^3 = 1.$$

В свою очередь, к *несимметричным режимам работы* относятся все остальные виды КЗ:

- двухфазное (междуфазное) $K^{(2)}$;
- двухфазное на землю $K^{(1,1)}$;
- однофазное на землю $K^{(1)}$.

Однако строгий математический анализ несимметричных коротких замыканий (НКЗ) существенно затруднен, поэтому для определения токов в жилах фаз кабеля используют уже упоминающийся *метод симметричных составляющих*. Этот метод удобен тем, что несимметричный режим представлен как результат наложения трех симметричных режимов (прямой, обратной, нулевой последовательности), таким образом, задача сводится к расчету трех симметричных режимов со сложением их результатов в конце.

Первым пунктом расчета НКЗ является построение схем прямой, обратной и нулевой последовательности с последующим эквивалентированием элементов и приведения схем к виду рис. 2.3, на котором приведен случай для фазы «А», поскольку при рассмотрении несимметричных режимов фаза «А» считается «особой». Началом схемы каждой из последовательностей является точка нулевого потенциала H_1, H_2, H_0 , где объединены все свободные концы ветвей генерации и нагрузки, а концом является точка короткого замыкания K_1, K_2, K_0 . Схема обратной последовательности отличается от схемы прямой последовательности отсутствием ЭДС. В схему нулевой последовательности входят элементы, по которым протекает ток нулевой последовательности и ее построение следует начинать от точки КЗ.

В условиях, когда авария произошла за кабелем рис. 2.1, справедливы уравнения результирующих сопротивлений схемы для токов соответствующих последовательностей и ЭДС:

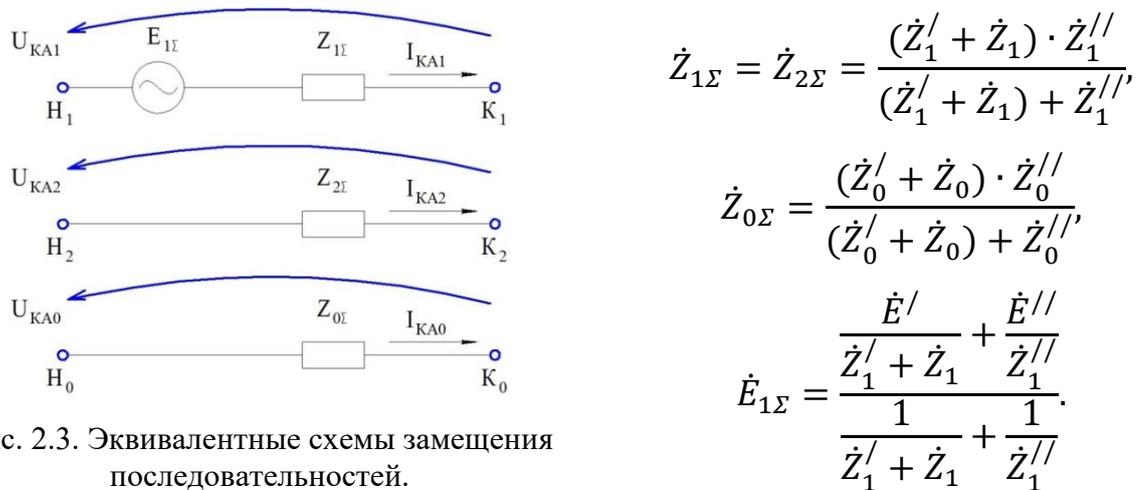


Рис. 2.3. Эквивалентные схемы замещения последовательностей.

Токи и напряжения разных последовательностей фазы «А» рис. 2.3 связаны с фазными токами и напряжениями трех фаз рис. 2.4 в месте КЗ следующим образом табл. 2.3 и записываются операторным способом:

Таблица 2.3
Формулы фазных напряжений и токов для ответвлений при НКЗ.

	Фазные напряжения	Фазные токи
Фаза «А»	$\dot{U}_{KA} = \dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{KA0}$	$i_{KA} = i_{KA1} + i_{KA2} + i_{KA0}$
Фаза «В»	$\dot{U}_{KB} = a^2 \dot{U}_{KA1} + a \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{KA0}$	$i_{KB} = a^2 i_{KA1} + a i_{KA2} + i_{KA0}$
Фаза «С»	$\dot{U}_{KC} = a \dot{U}_{KA1} + a^2 \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{KA0}$	$i_{KC} = a i_{KA1} + a^2 i_{KA2} + i_{KA0}$

где $i_{KA1}, i_{KA2}, i_{KA0}$ – симметричные составляющие тока КЗ в фазе «А»;

$U_{KA1}, U_{KA2}, U_{KA0}$ – симметричные составляющие напряжения в фазе «А».

Следует отметить, что согласно закону Ома можно записать следующие уравнения напряжений для точки КЗ, опираясь на рис. 2.3:

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{E}_{1\Sigma} - \dot{i}_{KA1} \cdot \dot{Z}_{1\Sigma},$$

$$\dot{U}_{KA2} = 0 - \dot{i}_{KA2} \cdot \dot{Z}_{2\Sigma},$$

$$\dot{U}_{KA0} = 0 - \dot{i}_{KA0} \cdot \dot{Z}_{0\Sigma}.$$

Приведенные на рис. 2.3 эквивалентные схемы замещения последовательностей должны быть объединены путем последовательно-параллельного соединения, причем характер соединения зависит от вида НКЗ и характеризующих его граничных условий по напряжению и току, которые записываются для ответвления КЗ, показанного на рис 2.4. Граничные условия по току и напряжению приведены в табл. 2.4 для каждого вида НКЗ. Как было сказано ранее при расчетах НКЗ фаза «А» является “особой”,

поскольку считается, что однофазные КЗ происходят на фазе «А», а двухфазные КЗ на фазах «В» и «С».

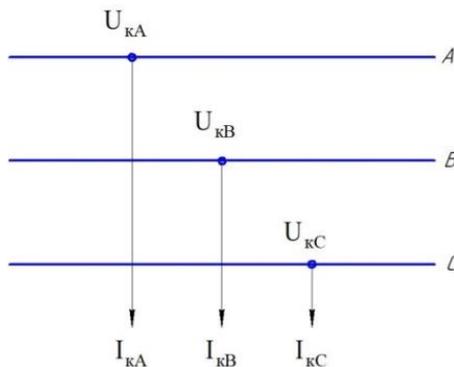


Рис. 2.4. Ответвления КЗ.

Таблица 2.4
Граничные условия по напряжению и току при расчетах НКЗ.

Вид НКЗ	Поврежденные фазы	Граничные условия по напряжению	Граничные условия по току
$K^{(1)}$	«А»	$\dot{U}_{кА} = 0$	$\dot{i}_{кВ} = 0$ $\dot{i}_{кС} = 0$
$K^{(2)}$	«В» и «С»	$\dot{U}_{кВ} = \dot{U}_{кС}$	$\dot{i}_{кА} = 0$
$K^{(1,1)}$	«В» и «С»	$\dot{U}_{кВ} = 0$ $\dot{U}_{кС} = 0$	$\dot{i}_{кА} = 0$

Преобразуем граничные условия для каждого вида НКЗ из табл. 2.4 с учетом уравнений фазных токов и напряжений из табл. 2.3 и комплексных схем замещения последовательностей, показанных в табл. 2.5. Комплексные схемы замещения используют для физического и комплексного моделирования НКЗ при помощи схем прямой, обратной и нулевой последовательности. Так при однофазном КЗ эквивалентные схемы замещения последовательностей соединяются в «треугольник», а при двухфазном КЗ в «звезду».

Таблица 2.5
Соединение схем последовательностей и преобразование граничных условий.

Однофазное КЗ	Двухфазное КЗ на землю	Двухфазное КЗ
$\dot{U}_{кА1} + \dot{U}_{кА2} + \dot{U}_{кА0} = 0$	$\dot{U}_{кА1} = \dot{U}_{кА2} = \dot{U}_{кА0}$	$\dot{U}_{кА1} = \dot{U}_{кА2}$
$\dot{i}_{кА1} = \dot{i}_{кА2} = \dot{i}_{кА0} = \frac{1}{3} \dot{i}_{кА}$	$\dot{i}_{кА1} + \dot{i}_{кА2} + \dot{i}_{кА0} = 0$	$\dot{i}_{кА1} + \dot{i}_{кА2} = 0$

Таким образом, сведем в одну общую таблицу 2.6 уравнения для определения токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей, пользуясь правилом эквивалентности прямой последовательности любого НКЗ, которое соответствует формуле $K^{(3)}$, но с использованием дополнительного сопротивления $\Delta\dot{Z}$:

$$i_{кА1} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{\dot{Z}_{1\Sigma} + \Delta\dot{Z}}$$

где $\Delta\dot{Z}$ – дополнительное сопротивление, определяющееся сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей в соответствии с видом НКЗ.

Таблица 2.6
Определение токов и напряжений разных последовательностей.

	Однофазное КЗ	Двухфазное КЗ на землю	Двухфазное КЗ
Граничные условия	$\dot{U}_{кА} = 0$ $\dot{I}_{кВ} = 0$ $\dot{I}_{кС} = 0$	$\dot{U}_{кВ} = 0$ $\dot{U}_{кС} = 0$ $\dot{I}_{кА} = 0$	$\dot{U}_{кВ} = \dot{U}_{кС}$ $\dot{I}_{кА} = 0$
Доп. сопротивление	$\Delta\dot{Z} = \dot{Z}_{2\Sigma} + \dot{Z}_{0\Sigma}$	$\Delta\dot{Z} = \frac{\dot{Z}_{2\Sigma} \cdot \dot{Z}_{0\Sigma}}{\dot{Z}_{2\Sigma} + \dot{Z}_{0\Sigma}}$	$\Delta\dot{Z} = \dot{Z}_{2\Sigma}$
Симметричные составляющие тока КЗ	$i_{кА1} = i_{кА2} = i_{кА0}$ $i_{кА1} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{\dot{Z}_{1\Sigma} + \Delta\dot{Z}}$	$i_{кА1} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{\dot{Z}_{1\Sigma} + \Delta\dot{Z}}$ $i_{кА2} = -\frac{\dot{E}_{1\Sigma} - i_{кА1} \cdot \dot{Z}_{1\Sigma}}{\dot{Z}_{2\Sigma}}$ $i_{кА0} = -\frac{\dot{E}_{1\Sigma} - i_{кА1} \cdot \dot{Z}_{1\Sigma}}{\dot{Z}_{0\Sigma}}$	$i_{кА1} = -i_{кА2}$ $i_{кА1} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{\dot{Z}_{1\Sigma} + \dot{Z}_{2\Sigma}}$
Симметричные составляющие напряжений	$\dot{U}_{кА1} + \dot{U}_{кА2} + \dot{U}_{кА0} = 0$ $\dot{U}_{кА1} = \dot{E}_{1\Sigma} - i_{кА1} \cdot \dot{Z}_{1\Sigma}$ $\dot{U}_{кА2} = -i_{кА2} \cdot \dot{Z}_{2\Sigma}$ $\dot{U}_{кА0} = -i_{кА0} \cdot \dot{Z}_{0\Sigma}$	$\dot{U}_{кА1} = \dot{U}_{кА2} = \dot{U}_{кА0}$ $\dot{U}_{кА1} = \dot{E}_{1\Sigma} - i_{кА1} \cdot \dot{Z}_{1\Sigma}$	$\dot{U}_{кА2} = \dot{U}_{кА1}$ $\dot{U}_{кА1} = \dot{E}_{1\Sigma} - i_{кА1} \cdot \dot{Z}_{1\Sigma}$
Ток в аварийной фазе	$i_{кА} = 3i_{кА1}$	$i_{кВ} = i_{кС} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{\dot{Z}_{2\Sigma} \cdot \dot{Z}_{0\Sigma}}{(\dot{Z}_{2\Sigma} + \dot{Z}_{0\Sigma})^2}} \cdot i_{кА1}$	$i_{кА} = \sqrt{3} \cdot i_{кА1}$

Дополнительно следует указать уравнение для расчета тока, протекающего в земле, при двухфазном и однофазном КЗ на землю:

$$\dot{I}_3 = 3 \cdot i_{кА0}.$$

С учетом приведенных формул можно определить токи последовательностей в жиле кабеля фазы «А», а также токи в жилах фаз кабеля в операторной форме:

$$i_{жА1} = \frac{\dot{E}'_A - \dot{U}_{кА1}}{\dot{Z}'_1 + \dot{Z}_1}; \quad i_{жА2} = \frac{-\dot{U}_{кА2}}{\dot{Z}'_2 + \dot{Z}_2}; \quad i_{жА0} = \frac{-\dot{U}_{кА0}}{\dot{Z}'_0 + \dot{Z}_0}.$$

$$i_{жА} = i_{жА1} + i_{жА2} + i_{жА0},$$

$$i_{кВ} = a^2 i_{жА1} + a i_{жА2} + i_{жА0},$$

$$i_{кС} = a i_{жА1} + a^2 i_{жА2} + i_{жА0}.$$

2.2. Основные расчетные режимы кабелей с полимерной изоляцией в сетях с изолированной нейтралью

Ранее уже говорилось, что расчетными режимами КПИ являются нормальный симметричный режим и один из наиболее тяжелых видов НКЗ. Наиболее тяжелым считается тот вид НКЗ, при котором будут наибольшие токи и напряжения в экранах.

Проведем анализ определения напряжения *на незаземленном конце экрана кабеля относительно земли*, которое в свою очередь представляет собой падение напряжения на экране, тем самым определим наиболее неблагоприятный вид НКЗ при одностороннем заземлении экрана. При этом, пренебрегая емкостями кабеля, можно записать граничные условия, указывающие на отсутствие протекания токов в экранах фаз кабеля при одностороннем заземлении:

$$i_{эА} = 0; \quad i_{эВ} = 0; \quad i_{эС} = 0.$$

С тем учетом, что падение напряжения на экране является напряжением на незаземленном конце экрана относительно земли, запишем уравнения, которые уже приводились ранее:

$$\dot{U}_{эА} = \dot{Z}_{жэ} \cdot i_{жА} + \dot{Z}_к \cdot i_{жВ} + \dot{Z}_к \cdot i_{жС},$$

$$\dot{U}_{эВ} = \dot{Z}_{жэ} \cdot i_{жВ} + \dot{Z}_к \cdot i_{жА} + \dot{Z}_к \cdot i_{жС},$$

$$\dot{U}_{эС} = \dot{Z}_{жэ} \cdot i_{жС} + \dot{Z}_к \cdot i_{жВ} + \dot{Z}_к \cdot i_{жА}.$$

Как видно из системы уравнений для расчета напряжений экранов фаз кабеля необходимо знать токи, протекающие в жилах фаз «А», «В», «С», которые были определены выше *методом симметричных составляющих*. Зная допущения и граничные условия, указанные в предыдущем разделе, можно преобразовать данную систему уравнений для каждого режима табл. 2.7. Для упрощения токи нагрузки можно не учитывать, ввиду малого значения по сравнению с токами КЗ.

Таблица 2.7

Напряжения на разземленном конце экрана относительно земли.

Режим	Допущения	Напряжения на экране	Наибольший коэффициент
Норм.	$i_{жА} + i_{жВ} + i_{жС} = 0$	$\dot{U}_{эА} = (\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к) \cdot i_{жА}$ $\dot{U}_{эВ} = (\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к) \cdot i_{жВ}$ $\dot{U}_{эС} = (\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к) \cdot i_{жС}$	$\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к$
$K^{(1)}$	$i_{жВ} = 0$ $i_{жС} = 0$	$\dot{U}_{эА} = \dot{Z}_{жэ} \cdot i_{жА}$ $\dot{U}_{эВ} = \dot{Z}_к \cdot i_{жА}$ $\dot{U}_{эС} = \dot{Z}_к \cdot i_{жА}$	$\dot{Z}_{жэ}$
$K^{(2)}$	$i_{жА} = 0$ $i_{жВ} + i_{жС} = 0 \Rightarrow$ $i_{жВ} = -i_{жС}$	$\dot{U}_{эА} = 0$ $\dot{U}_{эВ} = (\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к) \cdot i_{жВ}$ $\dot{U}_{эС} = -(\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к) \cdot i_{жВ}$	$\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к$
$K^{(1,1)}$	$i_{жА} = 0$ $i_{жВ} + i_{жС} = i_3,$ <p>где i_3 – ток в земле</p>	$\dot{U}_{эА} = \dot{Z}_к \cdot i_3$ $\dot{U}_{эВ} = (\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к) \cdot i_{жВ} + \dot{Z}_к \cdot i_3$ $\dot{U}_{эС} = -(\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к) \cdot i_{жВ} + \dot{Z}_{жэ} \cdot i_3$	$\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к$ и прибавка от тока в земле с коэффициентом $\dot{Z}_к$
$K^{(3)}$	$i_{жА} + i_{жВ} + i_{жС} = 0$	$\dot{U}_{эА} = (\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к) \cdot i_{жА}$ $\dot{U}_{эВ} = (\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к) \cdot i_{жВ}$ $\dot{U}_{эС} = (\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к) \cdot i_{жС}$	$\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_к$

По результатам расчета табл. 2.7 можно сравнить значения наибольшего коэффициента, определяющего напряжение на экране, для различных видов КЗ и констатировать:

- коэффициент будет максимальным при $K^{(1)}$;
- коэффициент будет минимальным при $K^{(2)}$ и $K^{(3)}$;
- коэффициент будет принимать среднее значение при $K^{(1,1)}$.

В сетях с номинальным напряжением 6-35 кВ токи однофазного КЗ на землю достаточно малы по сравнению с другими видами аварий, поэтому $K^{(1)}$ не является расчетным для данных сетей. Все виды КЗ, кроме однофазного, являются равноправными с точки зрения наибольшего коэффициента табл. 2.7, поскольку даже при $K^{(1,1)}$ ток в земле будет несущественным. Однако, как известно, максимальные токи в жиле кабеля протекают именно при трехфазном КЗ, к тому же режим $K^{(3)}$ более прост в рассмотрении, поэтому именно этот вид аварии принимается расчетным в сетях 6-35 кВ.

Таким образом, основными расчетными режимами табл. 2.8 в сетях с изолированной нейтралью 6-35 кВ являются нормальный симметричный режим работы, а также режим трехфазного КЗ. Следует отметить, что случаи КЗ указанные в табл. 2.8 происходят за кабелем. Однако в сетях высокого

напряжения 110-220 кВ с режимом заземления нейтрали эффективно- или глухозаземленным, токи однофазного КЗ будут достаточно близки по величине к токам трехфазного, именно поэтому режим $K^{(1)}$ тоже считается расчетным, поскольку в этом случае напряжение на незаземленном конце экрана кабеля относительно земли будет максимальным, что будет рассмотрено в следующей главе.

Таблица 2.8

Основные расчетные случаи (РС) для определения напряжения на экране.

№ РС	$U_{ном}$, кВ	Состояние экранов	Расчетный случай
1	6-35	Частично разземлены	Нормальный симметричный режим работы
		Транспонированы	
	110	Частично разземлены	
		Транспонированы	
	220	Частично разземлены	
		Транспонированы	
2	6-35	Частично разземлены или транспонированы	$K^{(3)}$ в сети за кабелем
		Частично разземлены	$K^{(1)}$ в сети за кабелем
	110	Транспонированы	$K^{(3)}$ сети за кабелем
		Частично разземлены	$K^{(1)}$ в сети за кабелем
	220	Транспонированы	$K^{(3)}$ в сети за кабелем
		Частично разземлены	

2.3. Однофазное короткое замыкание на землю в сетях 6 ÷ 35 кВ

Однофазное повреждение является наиболее распространенным в сетях, поэтому следует уделить внимание рассмотрению этого вида аварии. Следует отметить, что сети 6-35 кВ используют изолированный или компенсированный режим нейтрали, при этом возникающее однофазное КЗ в таких сетях еще называют простым замыканием. В предыдущих разделах, при анализе процессов происходящих в кабеле, брались в учет только собственные и взаимные погонные продольные активно-индуктивные сопротивления кабеля, при этом пренебрегались емкости кабеля, сети и примыкающих к его концам «систем». Однако при возникновении $K^{(1)}$ за кабелем необходимо учитывать емкости кабеля, поскольку весь емкостной ток I_C сети при данной аварии потечет по жиле кабеля, на котором произошло замыкание, что в свою очередь приведет к появлению тока близкого к I_C в экране, который заземлен по концам.

Рассмотрим сеть напряжением 6-35 кВ рис. 2.5, которая состоит из большого числа кабельных линий (КЛ) со сравнительно малыми сечениями

жил и экранов. Предположим, что емкостной ток I_C , возникший при $K^{(1)}$ за кабелем вблизи нагрузки, составляет десятки или даже сотни Ампер и превышает длительно-допустимые токи кабелей. Согласно ПУЭ ликвидация подобной аварии разрешается в течение суток, однако длительное воздействие может привести к нерасчетному перегреву КЛ1 данным током I_C и в последующем может произойти повреждение изоляции.

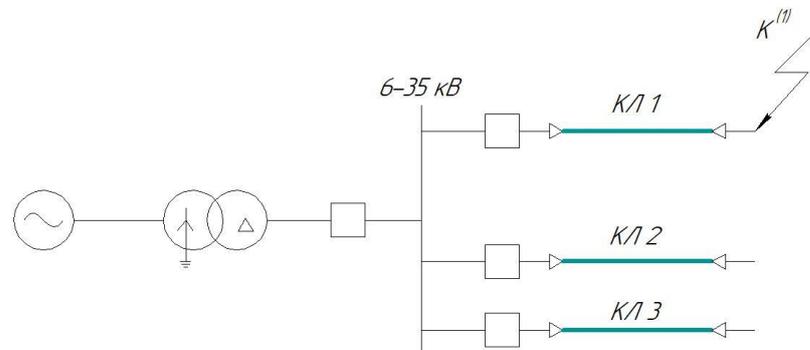


Рис. 2.5. Типовая схема кабельной сети 6-35 кВ.

Несмотря на потенциальную опасность повреждения от простого замыкания в сетях 6-35 кВ необходимо рассматривать, прежде всего, симметричные режимы, а случай $K^{(1)}$ стоит брать во внимание лишь тогда, когда емкостной ток I_C составляет сотни ампер и становится сопоставим с длительно-допустимой токовой нагрузкой кабеля.

2.4. Расчет напряжений экранов кабелей 6 ÷ 35 кВ

В сетях 6-35 кВ учет емкостей элементов сети является принципиальным только при расчетах токов однофазного короткого замыкания на землю. Однако ранее был сделан вывод о том, что расчетными режимами признаются симметричные режимы (нормальный, трехфазное КЗ за кабелем), при которых разрешается не учитывать емкостные составляющие. Для определения токов и напряжений в экране кабеля, зная граничные условия, указанные в табл. 2.2 для симметричных режимов и в табл. 2.4 для НКЗ, можно записать следующие допущения табл. 2.9:

Таблица 2.9
Допущения для расчетов токов и напряжений в экране кабеля.

Режим	Допущения
Симметричный режим работы	$i_{жА} + i_{жВ} + i_{жС} = 0$ $i_{эА} + i_{эВ} + i_{эС} = 0$
Аварийный режим (однофазное КЗ фазы «А» на землю вне кабеля)	$i_{жА} \gg i_{жВ} \text{ и } i_{жА} \gg i_{жС}$ <p style="text-align: center;">Или</p> $i_{жВ} = 0 \text{ и } i_{жС} = 0$

Теперь рассмотрим процесс расчета напряжения, наводимого на экране кабеля относительно земли при установленных расчетных случаях (РС) табл. 2.10, а конкретно при симметричном режиме работы и при однофазном КЗ вне кабеля. При анализе РС используются следующие состояния экрана:

- экран заземлен с двух сторон в начале и конце кабеля;
- разделение экрана на К секций, каждая из которых заземлена с одной стороны;
- экран прошел N циклов транспозиции.

Каждое указанное состояние экрана характеризуется своим коэффициентом в табл. 2.10, который необходимо умножить на длину кабеля l_k и ток $I_{жс}$, протекающий в его жиле, чтобы вычислить напряжение экрана. При этом в нормальном режиме $I_{жс}$ – это ток нагрузки, а в аварийном – это ток КЗ сети, проходящий по жиле кабеля, точное значение которого определяется по расчетам токов КЗ с учетом параметров кабеля и примыкающих к нему систем.

Таблица 2.10
Напряжение, наводимое на экран кабеля относительно земли, В.

№	Состояние экрана	Коэффициент при симметричном режиме работы	Коэффициент при однофазном КЗ вне кабеля	Сомножитель
1	Двухстороннее заземление	≈ 0	≈ 0	$i_{ж} \cdot l_k$
2	Разделение на К секций	$\frac{1}{K} \cdot (\dot{Z}_{жэ}^* - \dot{Z}_K^*)$	$\frac{1}{K} \cdot \dot{Z}_{жэ}^*$	
3	Транспонирование N циклов	$\frac{1}{3N} \cdot (\dot{Z}_{жэ}^* - \dot{Z}_K^*)$	$\frac{2}{9N} \cdot (\dot{Z}_{жэ}^* - \dot{Z}_K^*)$	

Исходя из значений коэффициентов при транспозиции табл. 2.10 видно, что наибольшее напряжение на экране будет наводиться в случае симметричного режима работы (трехфазное КЗ), а не при однофазном КЗ вне кабеля, что видно из следующего неравенства:

$$\frac{1}{3N} \cdot (\dot{Z}_{жэ}^* - \dot{Z}_K^*) > \frac{2}{9N} \cdot (\dot{Z}_{жэ}^* - \dot{Z}_K^*),$$

по сути значения сопротивлений данного неравенства можно не учитывать, исключив их из неравенства, и оставить следующее:

$$\frac{1}{3N} > \frac{2}{9N}.$$

Токи в экранах фаз кабеля в зависимости от состояния экрана.

№	Симметричный режим работы	Режим $K^{(1)}$ вне кабеля
1	$i_{\text{эА}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{жэ}}^* - \dot{Z}_{\text{к}}^*}{\dot{Z}_{\text{э}}^* - \dot{Z}_{\text{к}}^*} \cdot i_{\text{жА}}$ $i_{\text{эВ}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{жэ}}^* - \dot{Z}_{\text{к}}^*}{\dot{Z}_{\text{э}}^* - \dot{Z}_{\text{к}}^*} \cdot i_{\text{жВ}}$ $i_{\text{эС}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{жэ}}^* - \dot{Z}_{\text{к}}^*}{\dot{Z}_{\text{э}}^* - \dot{Z}_{\text{к}}^*} \cdot i_{\text{жС}}$	$i_{\text{эА}} = -\frac{(\dot{Z}_{\text{жэ}}^* - \dot{Z}_{\text{к}}^*) \cdot \frac{\dot{Z}_{\text{жэ}}^* - 2\dot{Z}_{\text{к}}^*}{\dot{Z}_{\text{э}}^* - 2\dot{Z}_{\text{к}}^*}}{\dot{Z}_{\text{э}}^* - \dot{Z}_{\text{к}}^*} \cdot i_{\text{жА}}$ $i_{\text{эВ}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{к}}^* \cdot (\dot{Z}_{\text{э}}^* - \dot{Z}_{\text{жэ}}^*)}{(\dot{Z}_{\text{э}}^* - \dot{Z}_{\text{к}}^*) \cdot (\dot{Z}_{\text{э}}^* + 2\dot{Z}_{\text{к}}^*)} \cdot i_{\text{жА}}$ $i_{\text{эС}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{к}}^* \cdot (\dot{Z}_{\text{э}}^* - \dot{Z}_{\text{жэ}}^*)}{(\dot{Z}_{\text{э}}^* - \dot{Z}_{\text{к}}^*) \cdot (\dot{Z}_{\text{э}}^* + 2\dot{Z}_{\text{к}}^*)} \cdot i_{\text{жА}}$
2	$i_{\text{эА}} = j\omega \left(C_{\text{жэ}}^* \cdot \frac{l_{\text{к}}}{K} \right) \cdot \dot{U}_{\text{жА}}$ $i_{\text{эВ}} = j\omega \left(C_{\text{жэ}}^* \cdot \frac{l_{\text{к}}}{K} \right) \cdot \dot{U}_{\text{жВ}}$ $i_{\text{эС}} = j\omega \left(C_{\text{жэ}}^* \cdot \frac{l_{\text{к}}}{K} \right) \cdot \dot{U}_{\text{жС}}$	$i_{\text{эА}} = j\omega \left(C_{\text{жэ}}^* \cdot \frac{l_{\text{к}}}{K} \right) \cdot \dot{U}_{\text{жА}}$ $i_{\text{эВ}} = j\omega \left(C_{\text{жэ}}^* \cdot \frac{l_{\text{к}}}{K} \right) \cdot \dot{U}_{\text{жВ}}$ $i_{\text{эС}} = j\omega \left(C_{\text{жэ}}^* \cdot \frac{l_{\text{к}}}{K} \right) \cdot \dot{U}_{\text{жС}}$
3	$i_{\text{эА}} = j\omega \left(C_{\text{жэ}}^* \cdot \frac{l_{\text{к}}}{3N} \right) \cdot \dot{U}_{\text{жА}} \cdot \left(\frac{3}{4} - j\frac{\sqrt{3}}{4} \right)$ $I_{\text{эА}} = i_{\text{эА}} = \omega \left(C_{\text{жэ}}^* \cdot \frac{l_{\text{к}}}{2N\sqrt{3}} \right) \cdot U_{\text{жА}}$	$i_{\text{эА}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{жэ}}^* + 2\dot{Z}_{\text{к}}^*}{\dot{Z}_{\text{э}}^* + 2\dot{Z}_{\text{к}}^*} \cdot \frac{i_{\text{жА}}}{3}$ $i_{\text{эВ}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{жэ}}^* + 2\dot{Z}_{\text{к}}^*}{\dot{Z}_{\text{э}}^* + 2\dot{Z}_{\text{к}}^*} \cdot \frac{i_{\text{жА}}}{3}$ $i_{\text{эС}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{жэ}}^* + 2\dot{Z}_{\text{к}}^*}{\dot{Z}_{\text{э}}^* + 2\dot{Z}_{\text{к}}^*} \cdot \frac{i_{\text{жА}}}{3}$

Если проанализировать данные табл. 2.11, то можно сказать, что в симметричном режиме работы при состоянии экрана №2 и №3, т.е. при разделении экранов на K секций и при транспозиции N циклов, значения токов протекающих в экранах фаз значительно снизятся, за счет того, что эти токи определяются не взаимными сопротивлениями, как при состоянии экрана №1, а напряжениями жил относительно земли и емкостями главной СПЭ-изоляции «жила-экран». Также с помощью табл. 2.11 можно вычислить отношение тока в экране к току в жиле при разных режимах экрана.

2.5. Расчет экрана кабелей 6-35 кВ с изоляцией из СПЭ

В экранах, заземленных по концам, в нормальном и аварийном режиме протекают токи сопоставимые по величине с токами, протекающими в жиле, поэтому эксплуатацию трехфазной группы кабелей рекомендуют с принятием мер по снижению токов в экранах. При этом может показаться, что можно принять минимальное сечение экранов. Однако такой вывод преждевременен, поскольку ранее были рассмотрены случаи возникновения

КЗ только вне кабеля рис. 2.1., также следует помнить, что существует опасность возникновения повреждения изоляции «фаза-экран» рис. 2.6.

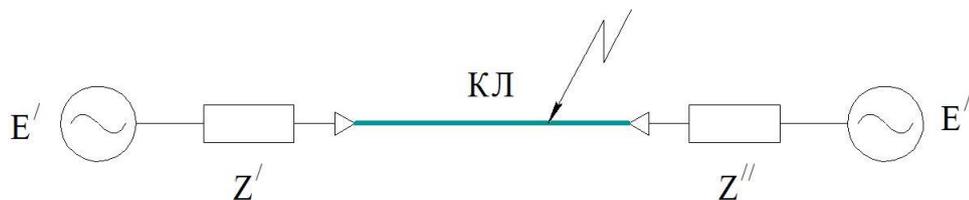


Рис. 2.6. Расчетная схема сети при повреждении изоляции КЛ.

В случае однофазного повреждения изоляции кабеля ток I_K , протекающий в жиле, попадает на ее экран, заземленный по концам, и далее в его заземляющие устройства рис. 2.7. Если релейная защита (РЗ) сработает быстро и оперативно, то даже большие значения токов замыкания I_K не смогут оказать неблагоприятного воздействия на соседние фазы кабеля. В свою очередь скорость отключения возникшей аварии $K^{(1)}$ зависит от используемого способа заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ.

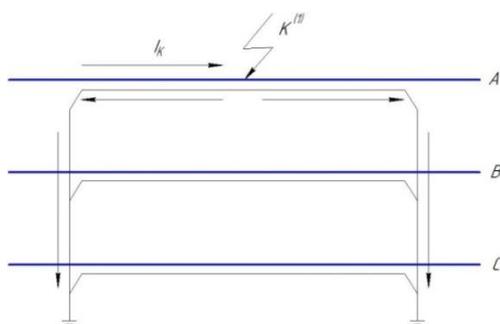


Рис. 2.7. Протекание токов в кабеле по экранам заземленным по концам при $K^{(1)}$.

Если сечение экрана не соответствует величине тока I_K , возникающего при аварии, и длительности его протекания, то появляется опасность термического разрушения экрана. При этом, данная ситуация неблагоприятна даже, если экран кабеля заземлен с одной стороны рис. 2.8 или применена транспозиция рис. 2.9.

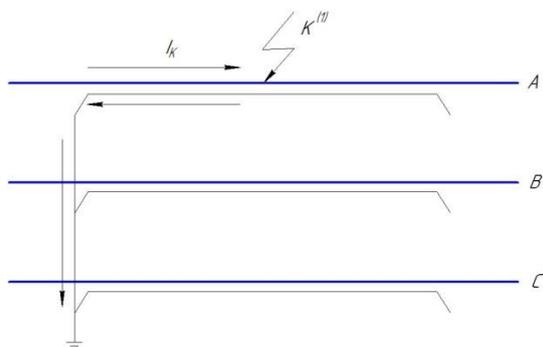


Рис. 2.8. Повреждение изоляции кабеля, экран заземлен с одной стороны

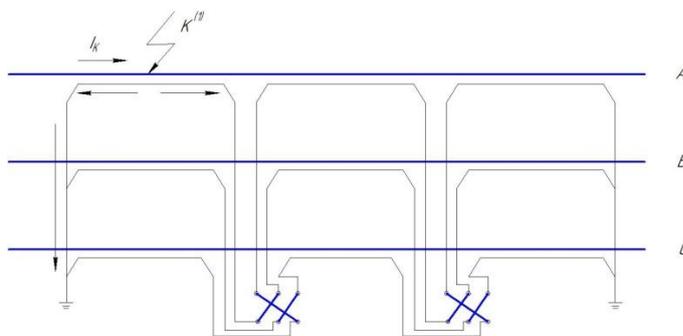


Рис. 2.9. Повреждение изоляции кабеля, применена транспозиция

В сетях 6-35 кВ, где используется изолированная нейтраль, при возникновении однофазного КЗ, ток замыкания, попадая на экран, будет проходить через емкости неповрежденных фаз. Именно поэтому он имеет емкостный характер и рассчитывается следующим образом:

$$I_C = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot C_{\Sigma},$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети;

C_{Σ} – суммарная емкость сети на землю.

В таких сетях КЛ снабжают трансформаторами тока нулевой последовательности (ТТНП), которые показывают сумму векторов фазных токов. В неповрежденных КЛ токи нулевой последовательности направлены к шинам 6-35 кВ, а в аварийной линии от шин, то есть эти токи имеют противоположный характер. Именно сравнение знаков токов нулевой последовательности позволяет выявить поврежденный участок, на котором произошла авария.

Заземление нейтрали через резистор в сетях 6-35 кВ позволяет улучшить работу РЗ за счет увеличения тока аварийной линии, поскольку в поврежденной КЛ появляется дополнительная активная составляющая тока I_R , на которую реагирует ТТНП:

$$I_R = \frac{U_{\text{ном}}/\sqrt{3}}{R},$$
$$I_K^{(1)} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}.$$

Правильный подбор сопротивления резистора R обеспечивает заметное различие тока протекающего в аварийной и неповрежденной линии, что дает автоматике сигнал на точное срабатывание и отключение поврежденной КЛ.

Подбор сечения экранов однофазных кабелей в сетях с резистивно-заземленной нейтралью следует подбирать исходя из термической стойкости к токам КЗ $I_K^{(1)}$, с учетом резистивного тока I_R по соответствующим номограммам, приводимым в каталогах производителей кабелей.

Таким образом, выбор сечения экранов кабелей должен производиться по известному неравенству:

$$I_K \leq K_{\Sigma} \cdot \frac{F_{\Sigma}}{\sqrt{t_K}},$$

где I_K – ток короткого замыкания, [кА];

$F_{\text{Э}}$ – экономическое сечение медного экрана, [мм²];

$K_{\text{Э}} = 0,174$ – коэффициент пропорциональности, [кА√с/мм²];

t_k – время отключения аварии [с].

2.6. Обобщающие расчеты для кабелей 6-35 кВ

В данном параграфе будет рассматриваться расчет для однофазных кабелей 6-10 кВ с изоляцией из СПЭ. Исходные данные по КПИ, используемые в расчете, приведены в Приложении.

Приведем основные обозначения табл. 2.12, формулы геометрических характеристик кабеля табл. 2.13 и формулы основных электрических параметров кабеля 2.14.

Таблица 2.12
Основные обозначения для расчета токов и напряжений в экранах одножильных кабелей.

Обозначение	Определение
$F_{\text{ж}}$	Сечение жилы кабеля, мм ²
$F_{\text{Э}}$	Сечение экрана кабеля, мм ²
l_k	Длина кабеля, м
$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$	Абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м
ε_1	Относительная диэлектрическая проницаемость изоляции между жилой и экраном, о.е.
ε_2	Относительная диэлектрическая проницаемость оболочки, о.е.
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	Абсолютная магнитная проницаемость вакуума, Гн/м
$\rho_{\text{ж}}$	Удельное сопротивление материала жилы кабеля, Ом·м
$\rho_{\text{Э}}$	Удельное сопротивление материала экрана кабеля, Ом·м
$\rho_{\text{з}}$	Удельное сопротивление грунта, Ом·м
S	Эквивалентное расстояние между осями соседних фаз, мм
f	Частота напряжений и токов, Гц
$\omega = 2\pi \cdot f$	Угловая частота напряжений и токов, рад/с
$j = \sqrt{-1}$	Мнимая единица
$\delta_{\text{ж}}$	Толщина полупроводящего диэлектрического слоя по жиле, мм
δ_u	Толщина изоляции из СПЭ, мм
δ_{nn1}	Толщина полупроводящего диэлектрического слоя по изоляции, мм
δ_{nn2}	Толщина полупроводящего герметизирующего слоя по экрану, мм
δ_o	Толщина оболочки кабеля, мм
l_k	Длина кабельной линии, км

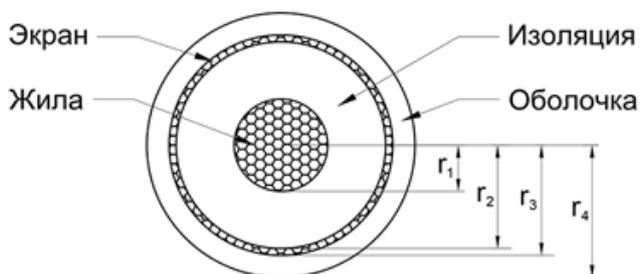


Рис. 2.10. Геометрические характеристики и конструкция одножильного кабеля.

Таблица 2.13

Формулы для расчета геометрических характеристик одножильного кабеля.

Формула	Определение
$r_1 = \sqrt{\frac{F_{ж}}{\pi}}$	Внешний радиус жилы кабеля, мм
$r_2 = r_1 + \delta_{ж} + \delta_{и} + \delta_{пп1}$	Внутренний радиус экрана кабеля, мм
$r_3 = \sqrt{r_2^2 + \frac{F_э}{\pi}}$	Внешний радиус экрана кабеля, мм
$r_4 = r_3 + \delta_{пп2} + \delta_0$	Внешний радиус кабеля, мм

Таблица 2.14

Формулы основных электрических параметров кабеля.

Формула	Определение
$R_{ж}^* = \frac{\rho_{ж}}{F_{ж}}$	Удельное активное сопротивление жилы, Ом/м
$R_э^* = \frac{\rho_э}{F_э}$	Удельное активное сопротивление экрана, Ом/м
$R_з^* = \frac{\pi}{4} \cdot \mu_0 \cdot f$	Удельное активное сопротивление земли, Ом/м
$D_з = 2,24 \cdot \sqrt{\frac{\rho_з}{\omega \cdot \mu_0}}$	Эквивалентная глубина проникновения тока в землю, м
$L_{ж}^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_з}{r_1}\right)$	Удельная собственная индуктивность жилы, Гн/м
$L_э^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_з}{r_2}\right)$	Удельная собственная индуктивность экрана, Гн/м
$M_{жэ}^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_з}{r_2}\right)$	Удельная взаимная индуктивность между жилой и экраном, Гн/м
$M_к^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_з}{S}\right)$	Удельная взаимная индуктивность между жилой (экраном) и соседним кабелем, Гн/м
$C_{жэ}^* = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$	Удельная емкость между жилой и экраном, Ф/м
$C_{эз}^* = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_0}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}$	Удельная емкость между экраном и землей, Ф/м
$S = d_{AB} = d_{BC} = d_{AC}$	Эквивалентное расстояние между осями фаз для кабелей расположенных равносторонним треугольником ТФ, мм
$S = \sqrt[3]{d_{AB} \cdot d_{BC} \cdot d_{AC}} = 1,26 \cdot d_{AB}$	Эквивалентное расстояние между осями фаз для кабелей, проложенных в плоскости FF, мм

Согласно приведенным формулам табл. 2.13-2.14 составлено Приложение с расчетными размерными данными и параметрами кабелей отечественного производства АВВ-Москабель.

Следует учесть некоторые допущения для расчета формул основных электрических параметров кабеля табл. 2.14:

1. расстояние между осями фаз должно быть больше внешнего радиуса экрана, в связи с тем, что при сильном сближении кабелей может возникать нежелательное термическое воздействие фаз друг на друга $S \gg r_3$;
2. в расчетах допустимо не учитывать толщину экрана и считать только его внешний радиус исходя из того, что $r_3 \gg (r_3 - r_2)$;
3. можно не учитывать эффект близости (изменение сопротивления проводников из-за влияния токов соседних проводов) на частоте 50 Гц;
4. можно пренебречь токами смещения в земле.

Принимая в расчет указанные выше допущения, запишем формулы собственных и взаимных погонных продольных сопротивлений кабеля табл. 2.15:

Таблица 2.15

Формулы собственных и взаимных погонных продольных сопротивлений кабеля.

Формула	Определение
$\dot{Z}_ж^* = R_3 + R_{ж} + j\omega L_{ж}$	Собственное погонное сопротивление жилы, Ом/м
$\dot{Z}_э^* = R_3 + R_э + j\omega L_э$	Собственное погонное сопротивление экрана, Ом/м
$\dot{Z}_{жэ}^* = R_3 + j\omega M_{жэ}$	Взаимное погонное сопротивление между жилой и экраном кабеля, Ом/м
$\dot{Z}_к^* = R_3 + j\omega M_к$	Взаимное погонное сопротивление жилы (экрана) и соседнего кабеля, Ом/м

В ходе расчета активного сопротивления жилы $R_{жс}$ при определенной температуре t_1 необходимо учитывать влияние температурного коэффициента α на значение сопротивления для разных видов металлов табл. 2.16:

Таблица 2.16

Значения удельного сопротивления и температурного коэффициента для различных металлов.

Металл	$\rho \cdot 10^{-8}$, Ом·м при $t_0 = 20^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^{-3}$, $1/^\circ\text{C}$
Серебро	1,6	4,1
Медь	1,75	4,3
Золото	2,4	4
Алюминий	2,71	4,2
Свинец	22	3,7
Сталь	13,7	4
Бронза	3,5	3
Нержавеющая сталь	70	-

2.6.1. Расчет напряжений экранов кабелей

Проведем расчет зависимости величины напряжения, наводимого на экране, от сечения жилы кабеля 10 кВ с изоляцией из СПЭ в симметричном режиме. При этом рассматривается трехфазная группа однофазных кабелей расположенная в ряд (FF) и экран заземлен с одной стороны. Расстояние между фазами кабеля принимается равным $d_1 = 0,1$ м, $d_2 = 0,2$ м, $d_3 = 0,5$ м, причем третье «нетиповое» значение принято только для иллюстрации влияния эквивалентного расстояния между осями фаз на величину токов и напряжений в экранах. Удельное сопротивление грунта принимаем $\rho_3 = 1000$ Ом·м; длина кабеля принимается $l_k = 1000$ м; действующее значение тока в жиле фазы «А» $I_{жА} = 1000$ А.

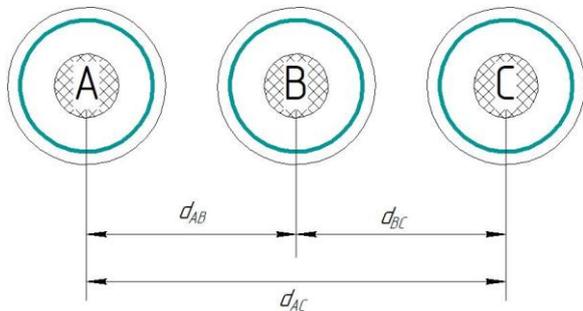


Рис. 2.11. Трехфазная группа однофазных кабелей с расположением кабелей в ряд FF.

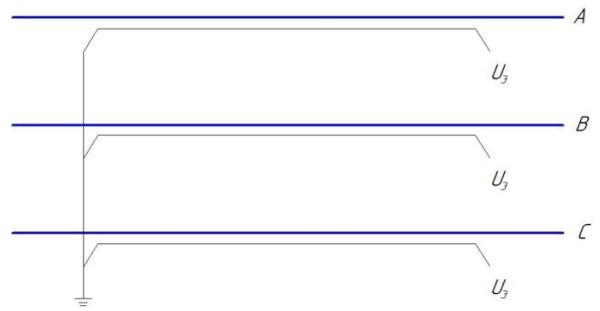


Рис. 2.12. Схема с односторонним заземлением экранов кабельной линии.

При одностороннем заземлении экранов ток в экранах принимается равным нулю, а напряжение на незаземленном конце экрана является падением напряжения на экране и рассчитывается следующим образом:

$$\dot{U}_{эА} = \Delta \dot{U}_{эА} = \dot{Z}_{жэ} \cdot \dot{I}_{жА} + \dot{Z}_к \cdot \dot{I}_{жВ} + \dot{Z}_к \cdot \dot{I}_{жС}.$$

Токи при симметричном режиме записываем следующим образом:

$$\dot{I}_{жА} = I_{жА} = 1000 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{жВ} = a^2 \cdot \dot{I}_{жА} = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 1000 = -500 - j866,025 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{жС} = a \cdot \dot{I}_{жА} = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 1000 = -500 + j866,025 \text{ А}.$$

Глубина проникновения магнитного поля в грунт:

$$D_3 = 2,24 \cdot \sqrt{\frac{\rho_3}{\omega \cdot \mu_0}} = 2,24 \cdot \sqrt{\frac{1000}{2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} = 3565 \text{ м}.$$

Для примера примем сечение жилы $F_{жс} = 50 \text{ мм}^2$, толщина изоляции $\delta_u = 3,4 \text{ мм}$, при этом толщина полупроводящих слоев принимается по $0,2 \text{ мм}$:

$$r_1 = \sqrt{\frac{F_{жс}}{\pi}} = \sqrt{\frac{50}{\pi}} = 3,989 \text{ мм},$$

$$r_2 = r_1 + \delta_{ж} + \delta_u + \delta_{пп1} = 3,989 + 0,2 + 3,4 + 0,2 = 7,789 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Эквивалентные расстояния между осями фаз для кабелей проложенных в плоскости (FF) для трех случаев:

$$S_1 = 1,26 \cdot d_1 = 1,26 \cdot 0,1 = 0,126 \text{ м},$$

$$S_2 = 1,26 \cdot d_2 = 1,26 \cdot 0,2 = 0,252 \text{ м},$$

$$S_3 = 1,26 \cdot d_3 = 1,26 \cdot 0,5 = 0,63 \text{ м}.$$

Далее рассчитываем основные электрические параметры кабеля:

$$R_3^* = \frac{\pi}{4} \cdot \mu_0 \cdot f = \frac{\pi}{4} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 = 4,935 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м},$$

$$M_{жэ}^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{r_2}\right) = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \ln\left(\frac{3565}{7,389 \cdot 10^{-3}}\right) = 2,607 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}},$$

$$M_{к1}^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{S_1}\right) = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \ln\left(\frac{3565}{0,126}\right) = 2,05 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}},$$

$$M_{к2}^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{S_2}\right) = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \ln\left(\frac{3565}{0,252}\right) = 1,911 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}},$$

$$M_{к3}^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{S_3}\right) = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \ln\left(\frac{3565}{0,63}\right) = 1,728 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}},$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{жэ}^* &= R_3 + j\omega M_{жэ}^* = 4,935 \cdot 10^{-5} + j \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 2,607 \cdot 10^{-6} = \\ &= 4,935 \cdot 10^{-5} + j8,189 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{к1}^* &= R_3 + j\omega M_{к1}^* = 4,935 \cdot 10^{-5} + j \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 2,05 \cdot 10^{-6} = \\ &= 4,935 \cdot 10^{-5} + j6,441 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{к2}^* &= R_3 + j\omega M_{к2}^* = 4,935 \cdot 10^{-5} + j \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 1,911 \cdot 10^{-6} = \\ &= 4,935 \cdot 10^{-5} + j6,005 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{к3}^* &= R_3 + j\omega M_{к3}^* = 4,935 \cdot 10^{-5} + j \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 1,728 \cdot 10^{-6} = \\ &= 4,935 \cdot 10^{-5} + j5,429 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м}, \end{aligned}$$

$$\dot{Z}_{жэ} = \dot{Z}_{жэ}^* \cdot l_{к} = (4,935 \cdot 10^{-5} + j8,189 \cdot 10^{-4}) \cdot 1000 = 0,049 + j0,819 \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_{к1} = \dot{Z}_{к1}^* \cdot l_{к} = (4,935 \cdot 10^{-5} + j6,441 \cdot 10^{-4}) \cdot 1000 = 0,049 + j0,644 \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_{к2} = \dot{Z}_{к2}^* \cdot l_{к} = (4,935 \cdot 10^{-5} + j6,005 \cdot 10^{-4}) \cdot 1000 = 0,049 + j0,601 \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_{к3} = \dot{Z}_{к3}^* \cdot l_{к} = (4,935 \cdot 10^{-5} + j5,429 \cdot 10^{-4}) \cdot 1000 = 0,049 + j0,543 \text{ Ом},$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{эА1}} &= \dot{Z}_{\text{жэ}} \cdot \dot{i}_{\text{жА}} + \dot{Z}_{к1} \cdot \dot{i}_{\text{жВ}} + \dot{Z}_{к1} \cdot \dot{i}_{\text{жС}} = \\ &= (0,049 + j0,819) \cdot (1000) + (0,049 + j0,644) \cdot (-500 - j866,025) + \\ &\quad + (0,049 + j0,644) \cdot (-500 + j866,025) = j174,893 \text{ В}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{эА2}} &= \dot{Z}_{\text{жэ}} \cdot \dot{i}_{\text{жА}} + \dot{Z}_{к2} \cdot \dot{i}_{\text{жВ}} + \dot{Z}_{к2} \cdot \dot{i}_{\text{жС}} = \\ &= (0,049 + j0,819) \cdot (1000) + (0,049 + j0,601) \cdot (-500 - j866,025) + \\ &\quad + (0,049 + j0,601) \cdot (-500 + j866,025) = j218,445 \text{ В}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{эА3}} &= \dot{Z}_{\text{жэ}} \cdot \dot{i}_{\text{жА}} + \dot{Z}_{к3} \cdot \dot{i}_{\text{жВ}} + \dot{Z}_{к3} \cdot \dot{i}_{\text{жС}} = \\ &= (0,049 + j0,819) \cdot (1000) + (0,049 + j0,543) \cdot (-500 - j866,025) + \\ &\quad + (0,049 + j0,543) \cdot (-500 + j866,025) = j276,017 \text{ В}. \end{aligned}$$

Исходя из приведенного расчета, можно сделать вывод о том, что расстояние между фазами кабеля d имеет большое влияние на величину напряжения $U_{\text{э}}$, наводимого на экране: чем больше расстояние между кабелями, тем больше напряжение и, соответственно, токи экранов, поэтому не рекомендуется располагать однофазные СПЭ-кабели соседних фаз далеко друг от друга.

Проведем подобный расчет для остальных сечений кабелей 6-10 кВ и сведем результаты расчета напряжений на экранах в табл. 2.17, а также по полученным данным построим графики зависимости напряжения экрана от сечения жилы и от расстояния между фазами рис. 2.13:

Таблица 2.17

Результаты расчетов зависимости напряжений от сечения жил кабеля.

$F_{\text{ж}}, \text{мм}^2$	$U_{\text{э1}}, \text{В}$	$U_{\text{э2}}, \text{В}$	$U_{\text{э3}}, \text{В}$
50	174,893	218,445	276,017
70	169,258	212,81	270,382
95	163,763	207,315	264,887
120	159,32	202,872	260,444
150	154,888	198,439	256,012
185	150,559	194,11	251,683
240	144,974	188,525	246,098
300	140,006	183,558	241,13
400	133,371	176,922	234,495
500	128,054	171,606	229,178
630	122,401	165,953	223,525
800	116,411	159,963	217,535
1000	110,69	154,241	211,814
1200	105,931	149,482	207,055

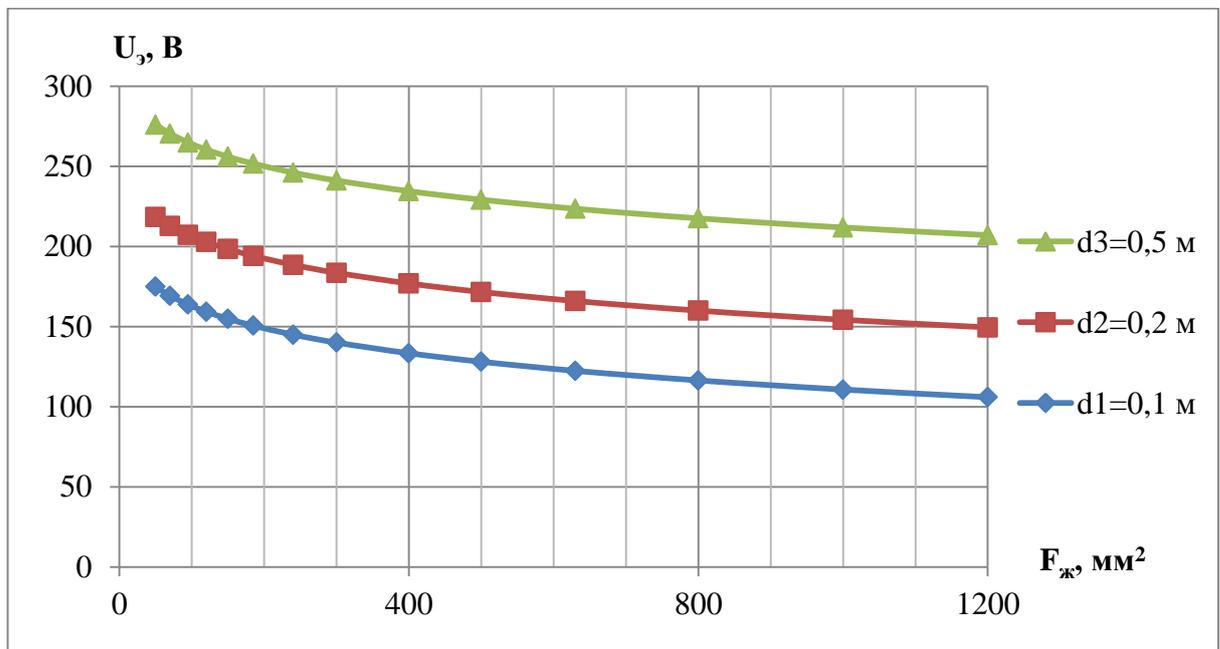


Рис. 2.13. Графики зависимости напряжения $U_{\text{э}}$, наводимого на экране (заземлен с одной стороны), однофазного кабеля 6-35 кВ трехфазной группы кабелей длиной 1000 м при токе жилы $I_{\text{ж}} = 1000$ А в симметричном режиме от сечения токопроводящей жилы $F_{\text{ж}}$ и от расстояния d между кабелями соседних фаз при расположении кабелей в плоскости.

Следует отметить, что для расчета напряжения на экране можно пользоваться формулой приведенной в табл. 2.10 №2:

$$\dot{U}_{\text{э}} = \frac{1}{K} \cdot (\dot{Z}_{\text{жэ}}^* - \dot{Z}_{\text{к}}^*) \cdot \dot{I}_{\text{ж}} \cdot l_{\text{к}},$$

принимаем, что экран разделен на $K = 1$ секцию и значения при этом будут аналогичные. Графиками рис.2.13 можно пользоваться для перерасчета напряжения на экране при других значениях длины КЛ и тока в жиле, так как данные зависимости получены при значениях $l_{\text{к}} = 1000$ м и $I_{\text{ж}} = 1000$ А, то формула перерасчета будет выглядеть следующим образом:

$$U_{\text{э}}^{\text{новое}} = U_{\text{э}}^{\text{рис.2.13}} \cdot \frac{l_{\text{к}}}{1000} \cdot \frac{I_{\text{ж}}}{1000} = U_{\text{э}}^{\text{рис.2.13}} \cdot L_{\text{к}} \cdot I_{\text{ж}} \cdot 10^{-6} \text{ В.}$$

Например, если КЛ имеет расположение фаз в плоскости с расстоянием между фаз $d = 0,2$ м, сечение жилы кабеля равно 400 мм^2 , длина КЛ 2500 м, ток жилы принимаем 750 А, тогда напряжение составит:

$$U_{\text{э}}^{\text{новое}} = U_{\text{э}}^{\text{рис.2.13}} \cdot l_{\text{к}} \cdot I_{\text{ж}} \cdot 10^{-6} = 176,922 \cdot 2500 \cdot 750 \cdot 10^{-6} = 331,729 \text{ В,}$$

Во всех рабочих режимах кабеля при частичном разземлении экрана должно выполняться условие:

$$U_{\text{э}} \leq U_{\text{э,доп}}$$

где $U_{\text{э,доп}}$ – допустимое напряжение на экране, [В, кВ].

Причем если к экрану кабеля возможно прикосновение человека, то следует принять напряжение, которое отвечает нормам безопасности $U_{э,доп} = 24$ В; а если прикосновение человека к экрану невозможно, то напряжение принимается по прочности изоляции экрана $U_{э,доп} = 5$ кВ.

Как видно для рассмотренной КЛ в случае, когда не существует возможности прикосновения человека к экрану, условие безопасности выполняется, и экран можно эксплуатировать частично разземленным. Однако если есть возможность прикосновения человека, то условие безопасности не выполняется, поэтому экран следует заземлять с двух сторон, но при этом возникает проблема появления токов в экранах близких к рабочим. Также отметим, что условие безопасности в теории может выполняться, но только в коротких по длине линиях.

Решением указанной выше проблемы может стать разделение экрана на секции с помощью транспозиции, при этом экран разделится на три секции, либо произвести разрыв экрана на две секции рис. 2.14, каждая из которых заземлена в местах, где возможно прикосновение человека к экрану, то есть в конце и начале линии.

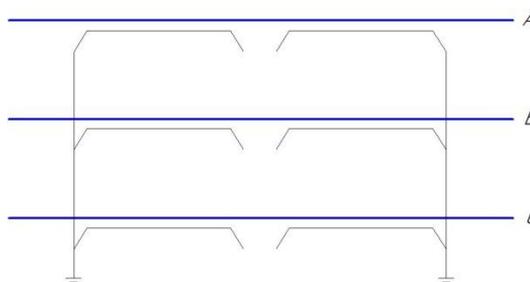


Рис. 2.14. Схема соединения трехфазной группы СПЭ-кабелей с разделенным на две секции экраном, заземленным со стороны начала и конца линии.

Для расчета наводимого на экран напряжения для кабелей 6-35 кВ при применении N полных циклов транспозиции и при разделении экрана на K секций при расчетном $K^{(3)}$ справедливы следующие расчетные формулы:

$$U_{э N} = \frac{U_{э}}{3N} \cdot l_{к} \cdot I_{ж} \cdot 10^{-6},$$

$$U_{э K} = \frac{U_{э}}{K} \cdot l_{к} \cdot I_{ж} \cdot 10^{-6}.$$

Исходя из представленных формул, можно сделать вывод об одинаковой эффективности этих мероприятий. Получается, транспозиция на

3N секций равнозначна делению экрана на K однократно заземленных секций.

2.6.2. Расчет доли токов в экранах кабелей

На основе табл. 2.11 можно получить более простое отношение токов в экране, заземленном по концам кабеля, к токам в жиле, протекающих в нормальном режиме. Данное отношение токов также можно назвать долей токов в экране:

$$\dot{D}_I = \frac{\dot{I}_э}{\dot{I}_ж} = -\frac{jX^*}{R_э^* + jX^*},$$

$$X^* = \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{S}{r_2}\right),$$

где X^* - погонное индуктивное сопротивление.

Взяв модуль комплексного числа, можно получить более простое выражение:

$$|\dot{D}_I| = \left| \frac{\dot{I}_э}{\dot{I}_ж} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_э^*}{X^*}\right)^2}}$$

Проведем анализ отношения токов в экране к токам в жиле при двухстороннем заземлении экранов. Также будем рассматривать « типовые » и « нетиповые » расстояния между жилами кабелей, которые приводились выше. Сечения экрана принимаются 25, 50, 95, 150, 240 мм², поскольку в технических характеристиках приводятся минимальные сечения экранов, а конечное значение выбирается по условиям протекания тока КЗ. Приведем пример для начального сечения жилы 150 мм². Удельное сопротивление медного экрана принимается $2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м

$$r_1 = \sqrt{\frac{F_ж}{\pi}} = \sqrt{\frac{150}{\pi}} = 6,91 \text{ мм},$$

$$r_2 = r_1 + \delta_ж + \delta_и + \delta_{пп1} = 6,91 + 0,2 + 3,4 + 0,2 = 10,71 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$R_э^* = \frac{\rho_э}{F_э} = \frac{2 \cdot 10^{-8}}{25 \cdot 10^{-6}} = 8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом}}{\text{м}}.$$

Индуктивное сопротивление рассчитаем сразу для трех случаев:

$$X_1^* = \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{S_1}{r_2}\right) = 314 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{0,1 \cdot 1,26}{10,71 \cdot 10^{-3}}\right) = -1,55 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом}}{\text{м}},$$

$$X_2^* = \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{S_2}{r_2}\right) = 314 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{0,2 \cdot 1,26}{10,71 \cdot 10^{-3}}\right) = -1,98 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом}}{\text{м}},$$

$$X_3^* = \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{S_3}{r_2}\right) = 314 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{0,5 \cdot 1,26}{10,71 \cdot 10^{-3}}\right) = -2,56 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом}}{\text{м}}.$$

Далее рассчитываем долю тока в экране для трех случаев:

$$|\dot{D}_{I1}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_3^*}{X_1^*}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{8 \cdot 10^{-4}}{-1,55 \cdot 10^{-4}}\right)^2}} = 0,19 \text{ о. е.},$$

$$|\dot{D}_{I2}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_3^*}{X_2^*}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{8 \cdot 10^{-4}}{-1,98 \cdot 10^{-4}}\right)^2}} = 0,24 \text{ о. е.},$$

$$|\dot{D}_{I3}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_3^*}{X_3^*}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{8 \cdot 10^{-4}}{-2,56 \cdot 10^{-4}}\right)^2}} = 0,3 \text{ о. е.}$$

Из полученных значений видно, что расстояние между осями соседних фаз имеет большое влияние на величину отношения токов в экране к токам в жиле. То есть чем больше расстояние между жилами соседних однофазных кабелей d , тем больше величина тока, протекающего в экране $I_э$.

Проведем анализ для остальных сечений жил и экранов. Результаты расчетов долей тока в экране D_I при расстоянии между соседними кабелями $d = 0,1 \text{ м}$, $d = 0,2 \text{ м}$, $d = 0,5 \text{ м}$ занесены в табл. 2.18-2.20, соответственно. По данным таблиц построены графики рис. 2.15-2.17, по которым можно сделать вывод: чем больше сечение экрана принято для кабеля, тем больше значения токов, протекающих в экране. При этом чем больше сечение жилы, тем меньше доля тока в экране.

Таблица 2.18

Результаты расчета отношения токов $I_э/I_{жс}$ при расстоянии между кабелями соседних фаз $d = 0,1 \text{ м}$, о.е.

$F_{ж}, \text{мм}^2 \backslash F_{э}, \text{мм}^2$	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200
25	0,19	0,18	0,18	0,17	0,16	0,16	0,15	0,14	0,14	0,13
50	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26
95	0,59	0,58	0,57	0,55	0,54	0,52	0,50	0,48	0,47	0,45
150	0,76	0,75	0,74	0,72	0,71	0,69	0,68	0,66	0,64	0,62
240	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79

Таблица 2.19
 Результаты расчета отношения токов $I_3/I_{жс}$ при расстоянии между кабелями соседних фаз $d = 0,2$ м, о.е.

$F_3, \text{мм}^2 \backslash F_{ж}, \text{мм}^2$	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200
25	0,24	0,24	0,23	0,22	0,22	0,21	0,20	0,20	0,19	0,18
50	0,44	0,44	0,43	0,42	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35
95	0,69	0,68	0,67	0,66	0,64	0,63	0,62	0,60	0,59	0,58
150	0,83	0,82	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75
240	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87

Таблица 2.20
 Результаты расчета отношения токов $I_3/I_{жс}$ при расстоянии между кабелями соседних фаз $d = 0,5$ м, о.е.

$F_3, \text{мм}^2 \backslash F_{ж}, \text{мм}^2$	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200
25	0,30	0,30	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26	0,25
50	0,54	0,53	0,52	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46
95	0,77	0,77	0,76	0,75	0,74	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70
150	0,89	0,88	0,88	0,88	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84
240	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93

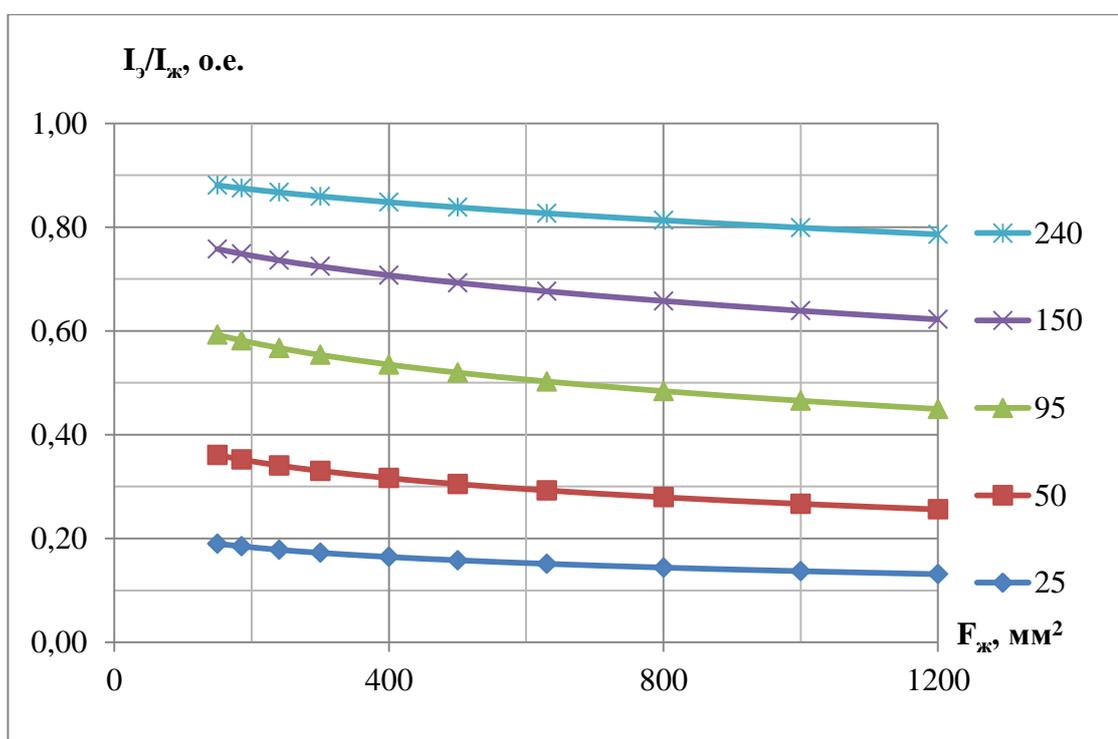


Рис. 2.15. Отношение токов в экране к токам в жиле однофазного СПЭ-кабеля 10 кВ в зависимости от сечения жилы $F_{жс}$ и сечения экрана F_3 . Расстояние между жилами соседних кабелей принято $d = 0,1$ м. Кривые, приведенные на графике «сверху-вниз» соответствуют сечениям экрана $F_3 = 240, 150, 95, 50, 25$ мм^2 .

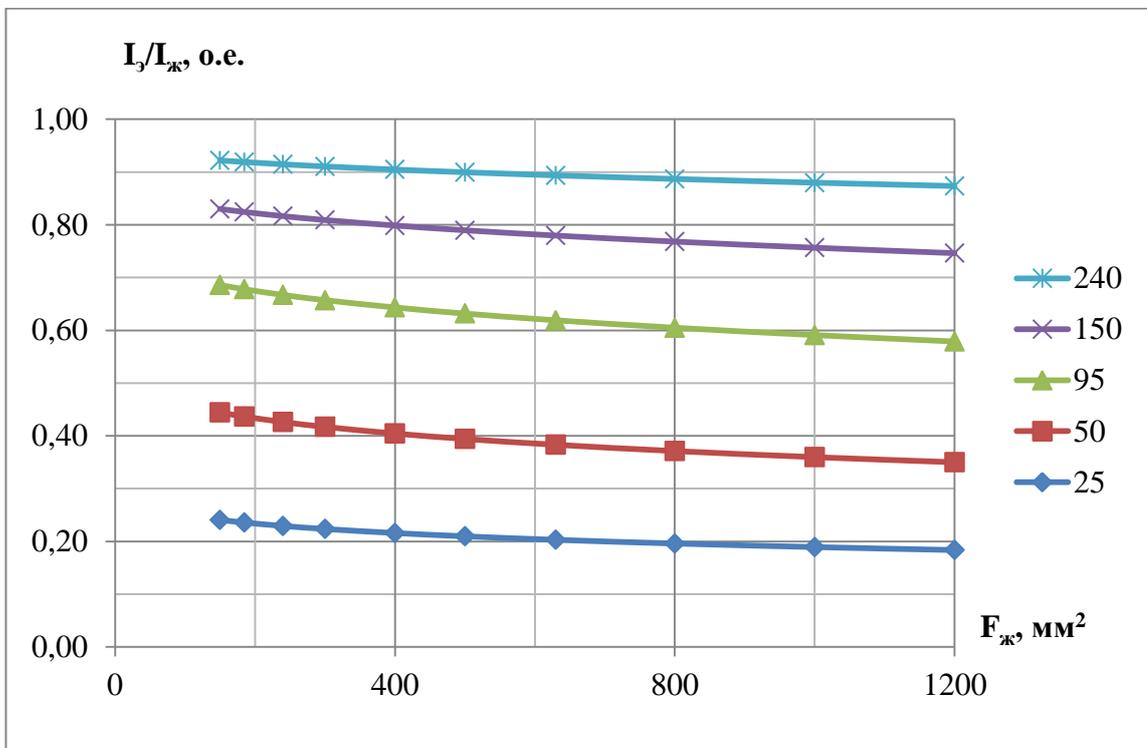


Рис. 2.16. Отношение токов в экране к токам в жиле однофазного СПЭ-кабеля 10 кВ в зависимости от сечения жилы $F_{ж}$ и сечения экрана $F_э$. Расстояние между жилами соседних кабелей принято $d = 0,2$ м. Кривые, приведенные на графике «сверху-вниз» соответствуют сечениям экрана $F_э = 240, 150, 95, 50, 25$ мм².

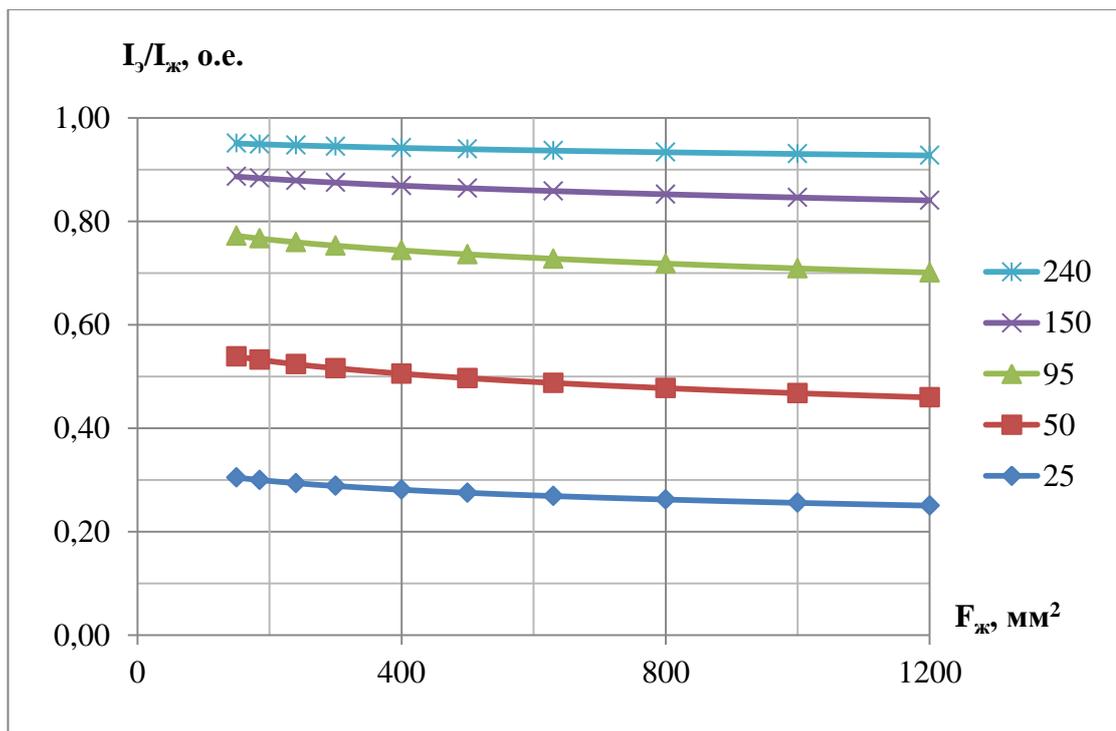


Рис. 2.17. Отношение токов в экране к токам в жиле однофазного СПЭ-кабеля 10 кВ в зависимости от сечения жилы $F_{ж}$ и сечения экрана $F_э$. Расстояние между жилами соседних кабелей принято $d = 0,5$ м. Кривые, приведенные на графике «сверху-вниз» соответствуют сечениям экрана $F_э = 240, 150, 95, 50, 25$ мм².

3. РАСЧЕТЫ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КПИ 110 ÷ 220 кВ

3.1. Симметричные и несимметричные режимы работы кабелей

110 ÷ 220 кВ

В России сети высокого напряжения (ВН) 110-220 кВ выполняются с эффективным или глухим заземлением нейтрали. В этих сетях симметричным режимом является трехфазное КЗ, а несимметричным – двухфазное или однофазное КЗ на землю. Причем в случае применения одностороннего заземления экрана токи $K^{(1)}$ будут принимать значения близкие к токам $K^{(3)}$, при этом будут достигаться наибольшие значения на незаземленном конце экрана. Поэтому одним из расчетных случаев в сетях ВН является случай $K^{(1)}$ вне кабеля при частичном разземлении кабеля.

В большинстве случаев для решения задач анализа параметров режимов КЛ используется известный *метод симметричных составляющих* (МСС), обоснование которого было предложено К.Л. Фортескью, а в последующем К.Ф. Вагнер и Р.Д. Эванс, основываясь на данный метод, применили его к несимметричным КЗ.

МСС основывается на допущении о том, что несимметричный режим исходно несимметричной трехфазной сети можно разложить на три симметричных режима в симметричных схемах прямой, обратной и нулевой последовательности (последняя имеет место в режимах, связанных с землей).

В действительности, кабельная линия особенно при исполнении в виде трех однофазных кабелей является несимметричным объектом. Возникающие в квазистационарных процессах установившегося режима электромагнитные поля проводников КЛ поддаются симметрированию традиционными средствами, как по параметрам режима, так и по параметрам сети, в частности, общеизвестной транспозицией. Без использования данного мероприятия можно констатировать возникновение разных токов в различных фазах при явлении взаимной индукции, а также возможен переход мощности, эквивалентный изменению величин погонных сопротивлений и погонной емкостной проводимости.

Как было выяснено в предыдущей главе, расстояние между фазными проводами и тросами цепей, другими словами компактность линии, имеет

значительное влияние на параметры установившегося режима КЛ. Физическим отражением этого являются электромагнитное влияние кабелей соседних между собой фаз. Так или иначе, применение мероприятий по симметрированию КЛ не создает абсолютно-равномерное электромагнитное поле вокруг проводов.

Тем не менее, с целью упрощения расчетов и моделирования объектов трехфазных систем для определения параметров режимов сетей используют *допущение о симметрии*, которое используют большинство программных комплексов анализа режимов.

Отметим, что перспективным в этих случаях можно считать метод фазных координат, сложности применения которого связаны с учетом взаимных влияний разных фаз МВЛ в условиях большой размерности схем последовательностей и соответствующих систем уравнений, в частности, их матричных описаний.

3.2. Основные расчетные случаи кабелей в сетях 110 ÷ 220 кВ

Как уже было сказано, в нормальном и аварийном режиме при заземлении экранов кабелей с двух сторон в экране начинают протекать токи близкие по значению к токам жил. Способами борьбы с этим нежелательным явлением является: заземление экранов только с одной стороны; применение транспозиции экранов.

Для радикального снижения токов в экранах при нормальном режиме и при КЗ в сети вне кабеля достаточно одного полного цикла транспозиции, но конечное число циклов N определяется исходя из ограничения напряжения U_{ε} , наводимого на экране в узлах транспозиции, воздействующего на изоляцию экрана, что подразумевает необходимость расчетного обоснования. Число циклов транспозиции выбирается исходя из уже указанного условия:

$$U_{\varepsilon} \leq U_{\varepsilon, \text{доп}},$$

где $U_{\varepsilon, \text{доп}}$ – допустимое напряжение для изоляции экрана по прочности, [В].

Прежде чем ввести в эксплуатацию изоляция экранов кабелей проходит жесткое испытание постоянным напряжением 5000 В на протяжении 1 минуты. Именно это напряжение принимается предельно допустимым значением промышленной частоты с точки зрения прочности изоляции.

Строго говоря, такой вид испытания целесообразно заменить на более щадящее с помощью установок пониженной частоты (0,1 Гц).

На стадии проектирования необходимо установить число и расположение транспозиционных коробок на строительной длине, чтобы расстояние между этими коробками было согласовано и не потребовало лишних монтажных работ. Следует отметить, что условием повышенной эффективности транспозиции экранов является одинаковая длина участков между узлами транспозиции, а также одинаковая прокладка фаз (либо только FF, либо только TF).

Также частичное разземление экранов с одной стороны рис. 3.1 является простым способом борьбы с токами, протекающими по экранам. В случае одностороннего заземления экрана на незаземленном конце экрана будет напряжение промышленной частоты в нормальном режиме и при режимах КЗ. Пусть $U_э$ - максимальное значение напряжения на экране относительно земли из всех режимов.

Как ранее отмечалось допустимым значением напряжения на экране является 24 В, если существует вероятность прикосновения человека к экрану кабеля. Данное допустимое значения принимается с точки зрения безопасности персонала. Если же происходит превышение допустимого значения $U_{э.доп}$, то в этом случае целесообразно применить разделение экрана на K секций (рис. 3.2, где показано $K = 4$), которые не соединяются друг с другом, но каждая секция имеет заземление с одной стороны и одинаковую длину. Экран делится на K секции до тех пор, пока не выполнится условие, которое также является условием выбора числа секций:

$$\frac{U_э}{K} \leq U_{э.доп}$$

Следует отметить, что при большом числе делений на K секции, несмотря на теоретическую эффективность, встает вопрос о трудности реализации подобного мероприятия, поскольку в конце и в начале КЛ, где, как правило, имеются заземляющие устройства, произвести заземление экрана не составляет труда, а на протяжении трассы устройства заземления необходимо предусматривать тем в большем количестве, чем больше число K секций. Поэтому следует отметить оптимизированную, более безопасную

для персонала и удобную схему рис. 3.3, с точки зрения реализации, так как предусматривается меньшее число заземляющих устройств.

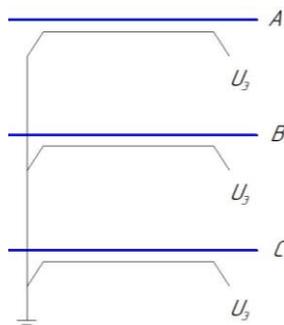


Рис. 3.1. Схема трехфазной группы однофазных кабелей с изоляцией из СПЭ при одностороннем заземлении экранов.

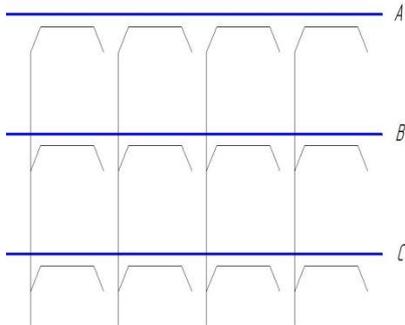


Рис. 3.2. Схема трехфазной группы однофазных кабелей с изоляцией из СПЭ при делении экрана на $K=4$ секций при одностороннем заземлении секций.

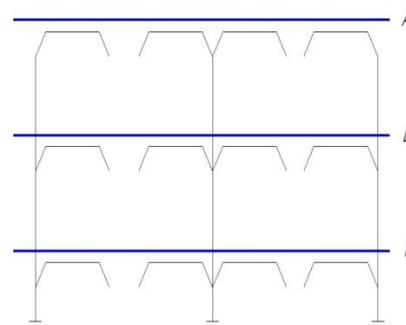


Рис. 3.3. Оптимизированная схема трехфазной группы однофазных кабелей с изоляцией из СПЭ при делении экрана на $K=4$ секций при одностороннем заземлении секций.

На рис. 3.4-3.6 приведены схемы соединения экранов трехфазных групп однофазных кабелей, когда экран разделен через узлы транспозиции. На рис. 3.4 показан один полный цикл транспозиции, на рис. 3.5 – два полных цикла транспозиции, на рис. 3.6 – два полных цикла транспозиции с заземлением средней точки. Следует отметить, что заземление средней точки рис. 3.6 может привести к ухудшению эффективности транспозиции, увеличению потерь в экранах и уменьшению пропускной способности.

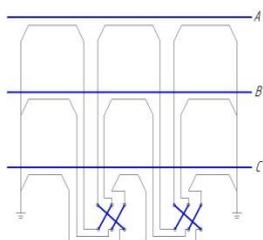


Рис. 3.4. Схема трехфазной группы однофазных кабелей с изоляцией из СПЭ при одном цикле транспозиции $N=1$.

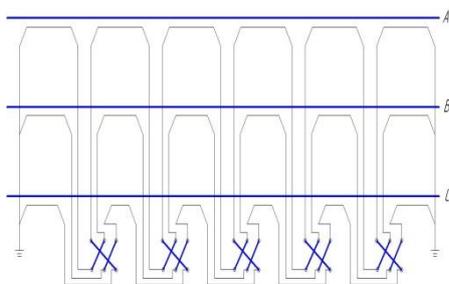


Рис. 3.5. Схема трехфазной группы однофазных кабелей с изоляцией из СПЭ при двух полных циклах транспозиции $N=2$ без заземления средней точки.

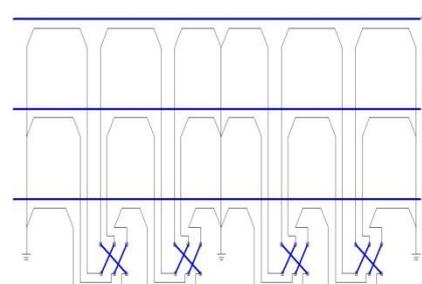


Рис. 3.6. Схема трехфазной группы однофазных кабелей с изоляцией из СПЭ при двух полных циклах транспозиции $N=2$ с заземленной средней точкой.

Из схем рис 3.1-3.3, на которых приведены схемы с односторонним заземлением экранов и делением на K секции, и схем рис. 3.4-3.6, на которых содержатся схемы с транспозицией и делением на $3N$ секции экранов, способных обеспечить допустимое напряжение на экране, в каждом

конкретном случае предпочтение должно быть отдано тому варианту обустройства экранов, который потребует меньшего числа.

3.3. Расчет напряжений экранов и определение конструкций экранов кабелей 110 ÷ 220 кВ с изоляцией из СПЭ

Зададим исходные данные для иллюстрации определения числа циклов транспозиции экранов для системы из трех однофазных кабелей 110 кВ с изоляцией из СПЭ: $F_{жс} = 1000 \text{ мм}^2$; $F_э = 185 \text{ мм}^2$; толщина изоляции $\delta_{и} = 15 \text{ мм}$, при этом толщина полупроводящих слоев принимается 0,2 мм; длина кабеля $l_k = 8100 \text{ м}$; расстояние между жилами фаз $d = 0,2 \text{ м}$; удельное сопротивление грунта $\rho_з = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Рассмотрим случай одностороннего заземления экрана. Очередность расчета напряжения, наводимого на экране, при одностороннем заземлении экрана была представлена в параграфе 2.6.1, поэтому оперируем сразу конечными данными табл. 3.1:

Таблица 3.1

Данные расчета напряжения на разомкнутом конце экрана для расчетных режимов.

	Нормальный режим	Режим $K^{(3)}$	Режим $K^{(1)}$
Коэффициент, Ом	$\frac{1}{K} \cdot (\dot{Z}_{жэ}^* - \dot{Z}_к^*) = 1,03$	$\frac{1}{K} \cdot (\dot{Z}_{жэ}^* - \dot{Z}_к^*) = 1,03$	$\frac{1}{K} \cdot \dot{Z}_{жэ}^* = 5,91$
Ток в жиле $I_{жс}$, А	1000	10000	10000
Напряжение на экране при $I_{жс}$, В	1031	10310	59090

В симметричном нормальном режиме работы получили напряжение на разомкнутом конце экрана 1031 В, что допустимо по условию прочности изоляции 5 кВ, но недопустимо по безопасности персонала 24 В.

В симметричном режиме $K^{(3)}$ получили напряжение на незаземленном конце экрана 10,31 кВ, что недопустимо по условию прочности изоляции.

В несимметричном режиме $K^{(1)}$ результат показал значение напряжения на экране при одностороннем заземлении 59,1 кВ, что значительно превышает допустимые значения напряжений.

Применение двухстороннего заземления экрана недопустимо в связи с тем, что в экране кабеля будет проходить ток сопоставимый с током жилы, что недопустимо, учитывая малое сечение экрана по сравнению с сечением жилы. Следовательно, для предложенного кабеля необходимо применить транспозицию табл. 3.2. В симметричных режимах работы при транспозиции

ток в экране имеет емкостной характер и составляет единицы Ампер, которым можно пренебречь.

Таблица 3.2

Данные расчета напряжения на экране кабеля при одном цикле транспозиции N=1.

	Нормальный режим	Режим $K^{(3)}$	Режим $K^{(1)}$
Коэффициент, Ом	$\frac{1}{3N} (\dot{Z}_{жэ}^* - \dot{Z}_к^*) = 0,34$	$\frac{1}{3N} (\dot{Z}_{жэ}^* - \dot{Z}_к^*) = 0,34$	$\frac{2}{9N} (\dot{Z}_{жэ}^* - \dot{Z}_к^*) = 0,23$
Ток в жиле $I_{жс}$, А	1000	10000	10000
Напряжение на экране при $I_{жс}$, В	343,641	3436	2291

В симметричном нормальном режиме работы получили напряжение в узле транспозиции экранов 344 В, что допустимо по условию прочности изоляции 5 кВ, но недопустимо по условию безопасности персонала 24 В.

В симметричном режиме $K^{(3)}$ напряжение в узле транспозиции 3,44 кВ, что допустимо по условию прочности изоляции.

В несимметричном режиме $K^{(1)}$ результат показал значение напряжения в узле транспозиции экранов 2,29 кВ, что удовлетворяет условию по прочности изоляции.

Можно предположить, что ток КЗ равен 20 кА, тогда в случае транспозиции при трехфазном КЗ напряжение в узле транспозиции экранов будет равняться 6,87 кВ, что недопустимо по условию прочности изоляции. В этом необходимо применить N=2 цикла транспозиции. Следует отметить, что точное значение тока КЗ рассчитывается по результатам расчетов токов КЗ с учетом параметров кабеля и примыкающих систем.

Таким образом, применение одного цикла транспозиции позволило снизить значение напряжения наводимого на экране кабеля при однофазном КЗ с 59,1 кВ до 2,3 кВ на каждый Ампер тока жилы при КЗ. В случае применения схемы рис. 3.2 для достижения напряжения 2,3 кВ пришлось бы использовать следующее количество секций $K = \frac{59,1}{2,3} = 26$.

Как видно, в кабелях ВН 110-220 кВ именно применение транспозиции экранов является оптимальным средством борьбы с продольными индуктированными токами в экранах.

4. БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ: Обеспечение безопасности при прокладке и эксплуатации кабельных линий

4.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов при эксплуатации и ремонте кабельных линий

В данном разделе будут рассмотрены вопросы обеспечения безопасности при прокладке и эксплуатации кабельных линий.

Кабельные линии (КЛ) являются одним из важнейших компонентов распределительной электрической сети, поэтому необходимо добиваться в их работе соответствия стандартам надежности и безопасности. Однако при эксплуатации, прокладке, ремонте, обслуживании КЛ или вследствие заводского брака могут возникать нежелательные явления, такие как повреждения изоляции кабелей, соединительных муфт или заделок, что в свою очередь может привести к электрическому, а иногда и к «заплывающему» пробоям, который характерен для соединительных кабельных муфт. Возникновение подобных дефектов может привести к отказу кабельной системы, поэтому применяются специальные программы профилактического технического обслуживания. Добавим, что практически все повреждения кабельных систем с экструдированной изоляцией связаны с образованием древовидного пробоя (триинга) в результате воздействия воды, что приводит к повреждению и преобразованию в электрический триинг.

Повреждения изоляции КЛ могут возникать по ряду следующих причин:

- трещины или сквозные отверстия в свинцовой оболочке, совпадение нескольких бумажных лент, заусенцы на проволоках токоведущих жил в результате заводских дефектов;
- надломы изоляции жил при разводке, плохая пропайка соединительных зажимов, неполная заливка муфт мастикой, непропаянные шейки муфт в результате дефектов монтажа;
- при прокладке кабеля могут возникать чрезмерные перегибы на углах, перекрутка, изломы крутые изгибы на углах, изломы, вмятины;
- механические повреждения целостности изоляции из-за банальной неаккуратности при прокладке или раскопках на трассах;

- воздействие грунта или блуждающих токов на химический состав оболочки, что в свою очередь может вызывать коррозию;
- перегрев или старение изоляции.

Как указано в Правилах по охране труда (ПОТ) работы на линейных сооружениях кабельных линий электропередач имеют перечень опасных и вредных производственных факторов для человека, в состав которого входят:

1. возможность возникновения в месте проведения работ пожаро-, взрывоопасных и ядовитых сред;
2. воздействие лазерного излучения;
3. повышенные показатели влажности воздуха, температуры, уровня локальной вибрации;
4. движущиеся машины и механизмы, принимающие участие в проведении работ;
5. высокое значение напряжения в электрической цепи, которое может пройти через тело человека вследствие замыкания на него;
6. малый показатель освещенности рабочей зоны;
7. возможность попадания на работника остатков оптического волокна;
8. физические и эмоциональные перегрузки, которые могут привести к ухудшению состояния человека.

Стоит отметить, что в случае обнаружения нарушения ПОТ, при неисправности оборудования или предоставления недостаточных средств защиты, которые необходимы для проведения работ, исполнитель обязан сообщить об этом начальству. Также работник имеет право отказаться от выполнения работ, которые представляют опасность для его жизни или являются не предусмотренными трудовым договором, который был с ним заключен.

4.2. Мероприятия, обеспечивающие защиту от опасностей

Ремонт и прокладка КЛ связаны с раскопкой траншей и котлованов, подобные земляные работы должны быть согласованы, особенно в случае, когда работа производится в зоне расположения подземных сооружений и коммуникаций. Во избежание повреждений необходимо использовать план, на котором отмечена глубина и местоположение коммуникаций.

Ответственный руководитель работ перед началом прокладки кабеля должен провести текущий инструктаж на рабочем месте и разъяснить:

- характер и методы выполнения работы при прокладке кабелей;
- правила распаковки и перемещения барабанов с кабелем;
- правила раскрутки кабеля с барабана;
- определить места установки механизмов, угловых роликов, если такие понадобятся при прокладке;
- порядок прохода на рабочее место;
- правила работы в траншеях и котлованах при разделке кабелей и монтаже муфт;
- правила подключения кабелей к оборудованию;
- порядок вызова скорой медицинской помощи, пожарной охраны и начальника участка.

Место работы должно быть временно ограждено, чтобы не допустить возможное возникновение несчастных случаев. В случае обнаружения неизвестных неуказанных на планах кабелей, трубопроводов, боеприпасов, земляные работы следует прекратить и сообщить начальству и не начинать продолжение работы без соответствующего указания.

При прокладке кабеля запрещается стоять внутри углов при повороте кабеля, для этого используют приспособления для раскатки кабеля (угловые ролики).

Процесс прокладки кабеля состоит из следующих пунктов:

- установка барабана с кабелем;
- подъем барабана домкратами;
- снятие обшивки с барабана;
- раскатка кабеля равномерными вращениями барабана с протяжкой кабеля вдоль трассы ручным или механизированным способом.

При транспортировке барабанов следует следить за тем, чтобы не происходило захвата одежды рабочих за выступающие концы барабана. Саму раскатку кабеля работники должны выполнять в рукавицах для защиты рук. В случае ручной прокладки кабеля рабочие должны перемещать его на плече

ближайшем к траншее, все по одну сторону от кабеля и при этом на каждого человека может приходиться 35 кг массы кабеля.

Протягивание кабеля через проемы в стенах допускается при условии, если с обеих сторон стены будут стоять рабочие и принимать меры предосторожности от попадания рук в проемы.

Перед вскрытием муфт или разрезанием кабеля в первую очередь необходимо убедиться с тем ли кабелем производится работа, для этого нужно проверить бирки, которые подвешиваются на кабели. Также следует проверить отсутствие напряжения. В тех случаях, когда броня подверглась коррозии, допускается присоединение заземляющего проводника к металлической оболочке кабеля. Если в результате повреждений кабеля открыты все токоведущие жилы, отсутствие напряжения можно проверять непосредственно указателем напряжения без прокола кабеля. При проколе кабеля следует надевать диэлектрические перчатки и защитные очки, при этом стоять нужно на изолирующем основании сверху траншеи как можно дальше от прокалываемого кабеля. Прокол кабеля должны выполнять два работника — допускающий и производитель работ; один из них непосредственно прокалывает кабель, а второй наблюдает. Вскрывать соединительные муфты и разрезать кабель в тех случаях, когда предварительный прокол не делается, следует заземленным инструментом, надев диэлектрические перчатки и защитные очки и стоя на изолирующем основании.

Стоит отметить, что все операции необходимо проводить с аккуратностью, чтобы не подвергать КЛ деформации, перегибам, повреждениям изоляции.

Согласно ПОТ необходимо провести контроль уровней вибрации, параметров микроклимата, концентрации вредных веществ.

Когда КЛ подвергаются коротким замыканиям, перегреву жил и осадке грунта возникает опасность обрыва токоведущих частей, поэтому силовые кабели подлежат периодическому осмотру на предмет дефектов, которые отражаются в специальном журнале, а затем планируются дальнейшие действия по устранению. С целью определения места повреждения кабеля

выявляют вид повреждения и в зависимости от этого выбирают соответствующий метод измерения.

В кабельных линиях низкого напряжения выявление вида повреждения осуществляют с помощью мегаомметра, которым измеряют сопротивление изоляции каждой токоведущей жилы кабельной линии по отношению к земле и между каждой парой жил. При определении целостности токоведущих жил мегаомметром предварительно устанавливают закоротку с одного конца кабеля.

В кабельных линиях высокого напряжения вид повреждения определяют путем поочередного испытания каждой жилы (с заземлением и без заземления остальных) постоянным током от установки типа АИИ-70 медленным подъемом напряжения до испытательного.

При двойном разрыве кабеля, повреждении изоляции жил в разных местах для выявления характера повреждения применяют приборы типа ИКЛ-4 и ИКЛ-5.

Иногда изоляция КЛ, имевшая пробой, начинает выдерживать повышенное напряжение — происходит «заплывающий» пробой, он характерен для соединительных кабельных муфт, когда в них образуются полости, играющие роль искрового промежутка. Одним из признаков места повреждения кабеля является характерный запах горелой оплетки кабеля. При повреждении кабеля в результате аварии токи короткого замыкания, как правило, сильно разрушают свинцовые и бронированные оболочки, поэтому при вскрытии кабеля место повреждения хорошо видно. Если повреждение скрыто, необходимо тщательно очистить предполагаемое место повреждения от земли и по возможности приподнять кабель.

Технология оценки состояния кабелей является эффективным и надёжным инструментом, позволяющим упростить программу запланированного технического обслуживания, так как она обеспечивает отличную индикацию состояния кабелей всех типов. Главной целью диагностических испытаний является определение дефектов, которые могут привести к отказу системы, и прогнозирование периода времени, который потребуется для того, чтобы эти дефекты привели к повреждению кабельной

системы. Полевые испытания кабельных систем, находящихся под рабочим напряжением для оценки их дальнейшей работы, повышают надёжность кабелей в распределительных системах. Это стало возможным благодаря новой технологии CableWISE. Эта технология является самой эффективной из существующих сегодня методов диагностики. Она обеспечивает раннее определение слабых компонентов кабельной системы, находящейся под напряжением. Этот метод позволяет определить местоположение изношенных компонентов системы и определить степень износа, что исключительно важно для обеспечения надёжности системы. Экономия получается за счёт определения приоритетов по замене слабых частей цепи и ремонта старых кабельных систем с экструдированной изоляцией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе составления ВКР был проведен анализ электрических параметров кабелей с изоляцией из СПЭ 6-220 кВ для симметричных и несимметричных режимов работы. По результатам исследования, которые были проведены в данной ВКР, можно сделать следующие выводы:

1. Сеть, состоящую из однофазного кабеля с СПЭ-изоляцией, можно представлять как двухпроводную линию с двумя контурами, которые образованы между жилой кабеля и обратным проводом в земле, а также между экраном и тем же обратным проводом.
2. При одностороннем заземлении экранов кабелей с СПЭ изоляцией ток в экране отсутствует, а падение напряжения на экране является напряжением незаземленного конца экрана относительно земли, которое зависит от длины кабеля и тока в жиле.
3. Основными расчетными режимами работы кабелей с СПЭ изоляцией следует принимать нормальный и аварийный режим работы, поскольку именно при КЗ по жиле протекают максимальные токи.
4. Величины токов протекающих по экранам, а также напряжения на экранах трехфазной группы однофазных кабелей зависят от расстояния между кабелями, чем меньше расстояние, тем меньше значения токов и напряжений. Однако сближение кабелей вплотную друг к другу может привести ухудшению эффективности охлаждения кабелей.
5. Для определения токов и напряжений при НКЗ следует пользоваться методом симметричных составляющих.
6. В сетях низкого напряжения 6-35 кВ однофазное КЗ не является расчетным случаем, так как токи в этом режиме малы. А в сетях 110-220 кВ токи однофазного замыкания близки по величине токам трехфазного КЗ, поэтому в этих сетях режим однофазного КЗ является расчетным.
7. Основные расчетные случаи приводятся для определения напряжения наводимого на экране кабеля при одностороннем заземлении экрана и последующим сравнением его с допустимыми значениями, исходя из чего, следует делать вывод о необходимости разделения экрана на секции.

8. Сечение экрана кабеля следует подбирать исходя из расчета тока короткого замыкания с учетом выбранного режима нейтрали сети.
9. Разделение экрана на секции или применение транспозиции способно уменьшить значения напряжений на экранах для соответствия допустимым значениям напряжения на экране.
10. Выбор бóльшего сечения экрана приводит к увеличению доли тока, протекающего в экране, относительно тока в жиле. Увеличение сечения жилы способно незначительно уменьшить долю тока экрана. Чем больше расстояние между кабелями соседних фаз, тем больше значения тока экрана.
11. При выборе схемы разделения экранов на K секций и при применения транспозиции N циклов необходимо отдавать предпочтение варианту с меньшим числом обустройства экранов.
12. Применение двухстороннего заземления экрана недопустимо, в связи с протеканием токов в экране кабеля сопоставимых по значению с токами в жилах. Поэтому необходимо применение разделения экрана на секции с помощью разделения на K секции или с помощью применения транспозиции.
13. Применение транспозиции с разделением экранов на $3N$ секций является оптимальным способом борьбы с индуцированными токами в экранах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Халилов Ф.Х.* Теоретические и практические проблемы применения кабельных линий электропередачи с полимерной изоляцией/ Халилов Ф. Х., Гольдштейн В. Г., Кузнецов Д. В.- М. : Энергоатомиздат, 2015.- 167 с.
2. *Дмитриев М.В.* Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ.-СПб.: Ид-во Политехн. ун-та, 2010.-154 с.
3. *Дмитриев М.В.* Однофазные и трехфазные кабели 6-35 кВ: Различия при выборе сечения экранов и схемы их заземления // Энергоэксперт. 2017. №1. С.49-53.
4. *Дмитриев М.В.* Однофазные кабели КЛ 6-500 кВ. Выбор взаимного расположения. // Новости ЭлектроТехники. 2018. №5(113)-6(114). С.52-55.
5. *Дмитриев М.В.* Напряжения, наведенные на кабельные линии 6-500 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. №6(45). С.88-93.
6. *Дмитриев М.В.* Транспозиция экранов кабелей 6-500 кВ. Практические аспекты использования // Новости ЭлектроТехники. 2012. №2(74). С.2-6.
7. *Сенько В.В.* Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах. Курс лекций.
8. Силовые кабели и кабельные системы 10-220 кВ. Современные решения в области силовых кабелей «АББ-Москабель».
9. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. - М.: ЭНАС, 2012 – 376 с.
10. ПОТ Р О-45-009-2003 Правила по охране труда при работах на линейных сооружениях кабельных линий передачи.
11. *Сибикин Ю.Д.* «Безопасность труда при монтаже, обслуживании и ремонте электрооборудования предприятий». – М.: Машиностроение, 2002г.
12. *Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю.* «Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования промышленных предприятий и установок». – М.: «Высшая школа» 2003г.

Таблица П.1
Технические характеристики кабеля напряжением 10 кВ.

$S_{\text{ном}}$	мм ²	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200	
$S_{\text{экp}}^*$	мм ²	16	16	16	16	25	25	25	25	35	35	35	35	35	50	
Толщина изоляции	мм	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	
Толщина оболочки	мм	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,7	2,7	2,9	2,9	
$D_{\text{внеш.}}^{**}$	мм	27,4	29,1	30,8	32,3	33,5	35,4	37,6	39,9	42,9	45,9	49,8	54	58,2	63,4	
Вес \approx^{***}	А	кг/км	689	784	891	994	1189	1329	1529	1746	2173	2512	2981	3543	4210	5152
	М		999	1217	1479	1737	2117	2473	3014	3602	4647	5606	6894	8492	10397	12781
R_{min} изгиба	см	42	44	47	49	51	53	57	60	65	69	75	81	87	95	
$F_{\text{доп.тяж}}$	А	кН	1,5	2,1	2,85	3,6	4,5	5,55	7,2	9	12	15	18,9	24	30	36
	М		2,5	3,5	4,75	6	7,5	9,25	12	15	20	25	31,5	40	50	60
Макс. поставка одной длиной	м	11760	10380	9150	8550	7810	7090	6410	5810	5270	4760	4290	3790	3410	3050	
$I_{\text{дд в земле}}^{\text{TF}^{***}}$	М	А	223	273	326	370	414	467	540	607	683	768	858	947	1026	1060
	А		173	212	253	288	322	365	423	477	543	618	702	788	871	920
$I_{\text{дд в земле}}^{\text{FF}^{***}}$	М	А	231	282	336	379	421	472	542	606	662	736	814	889	957	945
	А		180	220	262	296	331	373	431	484	540	609	683	759	833	746
$I_{\text{дд в воздухе}}^{\text{TF}^{***}}$	М	А	259	322	391	450	509	581	683	782	899	1030	1175	1327	1452	1541
	А		201	250	304	350	396	454	535	614	715	829	959	1102	1230	1334
$I_{\text{дд в воздухе}}^{\text{FF}^{***}}$	М	А	301	374	454	522	582	662	771	875	969	1090	1222	1355	1497	1501
	А		234	292	355	409	458	525	615	702	796	909	1036	1170	1308	1351

*Сечение экрана приведенное в таблице минимальное, может быть изменено исходя из условий протекания тока КЗ.

**Вес, внешний диаметр и длительно допустимые токи кабеля даны для марок ПвП и АПвП с минимальным сечением экрана. При выборе большего сечения экрана длительно допустимые токи уменьшаются.

Таблица П.2
Технические характеристики кабеля напряжением 20 кВ.

$S_{\text{ном}}$	мм^2	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200	
$S_{\text{экp}}^*$	мм^2	16	16	16	16	25	25	25	25	35	35	35	35	35	50	
Толщина изоляции	мм	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	
Толщина оболочки	мм	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,7	2,7	2,9	2,9	2,9	
$D_{\text{внеш.}}^{**}$	мм	31,6	33,3	34,9	36,4	37,7	39,6	41,8	44,1	47,5	50,5	54	58,6	62,4	67,6	
Вес \approx^{***}	A	кг/км	849	953	1073	1185	1386	1537	1751	1981	2455	2815	3277	3899	4557	5568
	M		1158	1386	1660	1927	2314	2681	3236	3838	4930	5908	7192	8848	10 744	13197
$R_{\text{мин}}$ изгиба	см	48	50	52	55	57	60	63	66	72	76	81	88	94	101	
$F_{\text{доп.тяж}}$	A	кН	1,5	2,1	2,85	3,6	4,5	5,55	7,2	9	12	15	18,9	24	30	36
	M		2,5	3,5	4,75	6	7,5	9,25	12	15	20	25	31,5	40	50	60
Макс. поставка одной длиной	м	8380	7500	6670	6250	5770	5260	4790	4370	3990	3620	3260	2910	2640	2370	
$I_{\text{дд в земле}}$ TF***	M	A	224	274	327	371	416	469	542	610	687	774	869	961	1040	1073
	A		174	213	254	289	323	366	424	479	545	621	706	794	879	928
$I_{\text{дд в земле}}$ FF***	M	A	231	282	337	382	423	474	545	609	667	742	823	900	966	953
	A		180	220	262	298	332	374	432	485	543	612	688	765	839	852
$I_{\text{дд в воздухе}}$ TF***	M	A	261	325	394	453	512	585	687	786	903	1036	1182	1336	1468	1555
	A		203	252	306	352	398	457	537	616	717	830	960	1104	1236	1340
$I_{\text{дд в воздухе}}$ FF***	M	A	298	371	450	517	577	657	764	868	965	1088	1221	1359	1500	1509
	A		232	289	351	404	454	519	608	694	788	902	1028	1165	1304	1352

*Сечение экрана приведенное в таблице минимальное, может быть изменено исходя из условий протекания тока КЗ.

**Вес, внешний диаметр и длительно допустимые токи кабеля даны для марок ПвП и АПвП с минимальным сечением экрана. При выборе большего сечения экрана длительно допустимые токи уменьшаются.

Таблица П.3

Технические характеристики кабеля напряжением 35 кВ.

$S_{ном}$	мм ²	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200	
$S_{экр}^*$	мм ²	16	16	16	16	25	25	25	25	35	35	35	35	35	50	
Толщина изоляции	мм	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
Толщина оболочки	мм	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,7	2,7	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	
$D_{внеш.}^{**}$	мм	38,2	39,9	41,6	43,1	44,7	46,7	49,3	51,6	55	58	61,4	65,6	69,4	74,6	
Вес \approx^{***}	А	кг/км	1171	1293	1428	1556	1770	1948	2214	2470	2980	3371	3863	4495	5162	6324
	М		1480	1726	2016	2298	2698	3093	3699	4326	5455	6465	7781	9445	11 379	13953
R_{min} изгиба	см	57	59	63	65	67	70	74	78	83	87	92	99	104	112	
$F_{доп.тяж}$	А	кН	1,5	2,1	2,85	3,6	4,5	5,55	7,2	9	12	15	18,9	24	30	36
	М		2,5	3,5	4,75	6	7,5	9,25	12	15	20	25	31,5	40	50	60
Макс. поставка одной длиной	м	7690	6990	6290	5950	5520	5100	4670	4350	3950	3610	3280	2510	2700	2430	
$I_{дд}$ в земле TF^{***}	М	А	224	274	327	371	416	469	542	610	687	774	869	961	1040	1091
	А		174	213	254	289	323	366	424	479	545	621	706	794	879	939
$I_{дд}$ в земле FF^{***}	М	А	231	282	337	382	423	474	545	609	667	742	823	900	966	965
	А		180	220	262	298	332	374	432	485	543	612	688	765	839	861
$I_{дд}$ в воздухе TF^{***}	М	А	261	325	394	453	512	585	687	786	903	1036	1182	1336	1468	1572
	А		203	252	306	352	398	457	537	616	717	830	960	1104	1236	1346
$I_{дд}$ в воздухе FF^{***}	М	А	298	371	450	517	577	657	764	868	965	1088	1221	1359	1500	1520
	А		232	289	351	404	454	519	608	694	788	902	1028	1165	1304	1352

*Сечение экрана приведенное в таблице минимальное, может быть изменено исходя из условий протекания тока КЗ.

**Вес, внешний диаметр и длительно допустимые токи кабеля даны для марок ПвП и АПвП с минимальным сечением экрана. При выборе большего сечения экрана длительно допустимые токи уменьшаются.

Таблица П.4
Технические характеристики кабеля напряжением 110 кВ.

$S_{\text{ном}}$	мм ²	185	240	300	350	400	500	630	800	1000	1200	
$S_{\text{экp}}^*$	мм ²	35	35	35	35	35	35	35	35	35	50	
Толщина изоляции	мм	16	16	16	16	15	15	15	15	15	15	
Толщина оболочки	мм	3	3	3,2	3,4	3,4	3,4	3,6	3,6	3,8	4	
$D_{\text{внеш.}}$	мм	64	66	69	70	70	73	77	81	85	91	
Вес \approx^{***}	А	кг/км	3400	3700	4000	4230	4290	4830	5410	6140	7316	8422
	М		4560	5180	5870	6390	6760	7930	9310	11090	13699	16081
$R_{\text{мин}}$ изгиба	см	96	99	104	105	105	109	116	122	128	137	
$F_{\text{доп.тяж}}$	А	кН	5,55	7,2	9	10,5	12	15	18,9	24	30	36
	М		9,25	12	15	17,5	20	25	31,5	40	50	60
$R_{\text{пост.тока}}$	М	Ом/км	0,0991	0,0754	0,0601	0,0543	0,047	0,0366	0,028	0,0221	0,0176	0,0151
	А		0,164	0,125	0,1	0,089	0,0778	0,0605	0,0464	0,0367	0,0291	0,0247
Индуктивность****	мГн/км	0,4627	0,4439	0,4289	0,4209	0,4057	0,39	0,3781	0,363	0,351	0,339	
Емкость	мкФ/км	0,1364	0,1468	0,1575	0,1639	0,179	0,1936	0,209	0,2296	0,25	0,27	
$I_{\text{дд в земле}}$ ТФ*****	М	А	500	575	650	715	755	840	935	1030	1125	1184
	А		395	455	515	560	600	675	760	850	935	1009
$I_{\text{дд в земле}}$ FF	М	А	451	507	556	581	611	667	724	777	869	1028
	А		366	416	461	486	514	572	631	690	782	910
$I_{\text{дд в воздухе}}$ ТФ*****	М	А	600	690	775	835	895	995	1115	1245	1370	1494
	А		480	555	630	680	735	825	935	1060	1185	1317
$I_{\text{дд в воздухе}}$ FF	М	А	624	725	820	871	938	1065	1204	1352	1485	1533
	А		494	576	656	702	758	872	999	1139	1275	1344

*Сечение экрана приведенное в таблице минимальное и может быть изменено исходя из условий протекания тока КЗ.

**Вес дан для кабелей марок с полиэтиленовой оболочкой и основным сечением экрана.

***Расчет сделан при прокладке кабелей треугольником вплотную и заземлением экрана с двух сторон.

****Токи рассчитаны для глубины прокладки 1,5 м, удельного термического сопротивления грунта 1,20 К·м/Вт, и коэффициента нагрузки $K_n = 0,8$.

*****Токи рассчитаны при прокладке в воздухе и расположении в плоскости, расстояние между фазами кабеля — диаметр в свету, воздействия солнечной радиации нет, двухстороннее заземление.

Таблица П.5

Технические характеристики кабеля напряжением 220 кВ.

$S_{ном}$	мм ²	400	500	630	800	1000	1200	1600	2000	
$S_{экр}^*$	мм ²	265	265	265	265	265	265	265	265	
Толщина изоляции	мм	24	24	24	24	22	22	22	22	
Толщина оболочки	мм	4	4	4	4	4	4	4	4	
$D_{внеш.}$	мм	92,3	95,3	98,9	105,4	106,1	108,9	119,7	122,7	
Вес \approx^{***}	А	кг/км	9158	9739	10463	11630	11999	12834	14960	16352
	М		11685	12899	14445	16670	18269	20934	25074	28899
$R_{мин}$ изгиба	см	138	142	148	158	159	163	179	184	
$F_{доп.тяж}$	А	кН	16	20	25,2	32	40	48	64	80
	М		28	35	44,1	56	70	84	112	140
$R_{пост.тока}$	М	Ом/км	0,047	0,0366	0,028	0,0221	0,0176	0,0151	0,0113	0,009
	А		0,0778	0,0605	0,464	0,0367	0,0291	0,0247	0,0186	0,0149
Индуктивность****	мГн/км	0,254	0,236	0,219	0,203	0,18	0,167	0,152	0,139	
Емкость	мкФ/км	0,133	0,143	0,154	0,174	0,199	0,22	0,24	0,26	
$I_{дд}$ в земле ТФ*****	М	А	638	711	785	868	938	986	1072	1133
	А		519	585	657	731	803	858	948	1018
$I_{дд}$ в земле FF	М	А	620	670	725	774	812	862	910	940
	А		521	572	631	686	734	782	841	883
$I_{дд}$ в воздухе ТФ*****	М	А	800	908	1031	1160	1281	1380	1547	1669
	А		641	734	841	955	1071	1174	1339	1464
$I_{дд}$ в воздухе FF	М	А	796	884	977	1063	1136	1232	1327	1393
	А		658	743	836	927	1013	1101	1211	1295

*Сечение экрана приведенное в таблице минимальное и может быть изменено исходя из условий протекания тока КЗ.

**Вес дан для кабелей марок с полиэтиленовой оболочкой и основным сечением экрана.

***Расчет сделан при прокладке кабелей треугольником вплотную и заземлением экрана с двух сторон.

****Токи рассчитаны для глубины прокладки 1,5 м, удельного термического сопротивления грунта 1,20 К·м/Вт, и коэффициента нагрузки $K_n = 0,8$.

*****Токи рассчитаны при прокладке в воздухе и расположении в плоскости, расстояние между фазами кабеля — диаметр в свету, воздействия солнечной радиации нет, двухстороннее заземление.

Таблица П.6

Расчетные размерные данные кабелей 10 кВ отечественного производства

$S_{ж}, \text{мм}^2$	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200
$r_1, \text{мм}^*$	3,99	4,72	5,50	6,18	6,91	7,67	8,74	9,77	11,28	12,62	14,16	15,96	17,84	19,54
$\delta_{ж}, \text{мм}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$\delta_{и}, \text{мм}$	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
$\delta_{пн1}, \text{мм}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$r_2, \text{мм}^{**}$	7,79	8,52	9,30	9,98	10,71	11,47	12,54	13,57	15,08	16,42	17,96	19,76	21,64	23,34
$S_{экр}, \text{мм}^2$	16	16	16	16	25	25	25	25	35	35	35	35	35	50
$r_3, \text{мм}^*$	8,11	8,81	9,57	10,23	11,08	11,82	12,85	13,86	15,45	16,75	18,27	20,04	21,90	23,68
$\delta_{пн2}, \text{мм}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$\delta_{о}, \text{мм}$	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,7	2,7	2,9	2,9
$r_4, \text{мм}^{**}$	10,81	11,51	12,27	12,93	13,78	14,52	15,55	16,56	18,15	19,45	21,17	22,94	25,00	26,78

*Внешний радиус жилы кабеля и внешний радиус экрана кабеля рассчитываются с коэффициентами заполнения жилы и экрана равными 1.

**Толщина полупроводящих слоев по жиле, по изоляции, по экрану считается равным 0,2 мм.

Таблица П.7

Расчетные размерные данные кабелей 20 кВ отечественного производства

$S_{ж}, \text{мм}^2$	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200
$r_1, \text{мм}^*$	3,99	4,72	5,50	6,18	6,91	7,67	8,74	9,77	11,28	12,62	14,16	15,96	17,84	19,54
$\delta_{ж}, \text{мм}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$\delta_{и}, \text{мм}$	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
$\delta_{пш1}, \text{мм}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$r_2, \text{мм}^{**}$	9,89	10,62	11,40	12,08	12,81	13,57	14,64	15,67	17,18	18,52	20,06	21,86	23,74	25,44
$S_{экр}, \text{мм}^2$	16	16	16	16	25	25	25	25	35	35	35	35	35	50
$r_3, \text{мм}^*$	10,14	10,86	11,62	12,29	13,12	13,86	14,91	15,92	17,50	18,81	20,34	22,11	23,97	25,75
$\delta_{пш2}, \text{мм}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$\delta_{о}, \text{мм}$	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,7	2,7	2,9	2,9	2,9
$r_4, \text{мм}^{**}$	12,84	13,56	14,32	14,99	15,82	16,56	17,61	18,62	20,20	21,71	23,24	25,21	27,07	28,85

*Внешний радиус жилы кабеля и внешний радиус экрана кабеля рассчитываются с коэффициентами заполнения жилы и экрана равными 1.

**Толщина полупроводящих слоев по жиле, по изоляции, по экрану считается равным 0,2 мм.

Таблица П.8

Расчетные размерные данные кабелей 35 кВ отечественного производства

$S_{ж}, \text{мм}^2$	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200
$r_1, \text{мм}^*$	3,99	4,72	5,50	6,18	6,91	7,67	8,74	9,77	11,28	12,62	14,16	15,96	17,84	19,54
$\delta_{ж}, \text{мм}$	1,2	2,2	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,2	10,2	11,2	12,2	13,2	14,2
$\delta_{и}, \text{мм}$	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
$\delta_{пн1}, \text{мм}$	1,2	2,2	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,2	10,2	11,2	12,2	13,2	14,2
$r_2, \text{мм}^{**}$	15,39	18,12	20,90	23,58	26,31	29,07	32,14	35,17	38,68	42,02	45,56	49,36	53,24	56,94
$S_{экр}, \text{мм}^2$	16	16	16	16	25	25	25	25	35	35	35	35	35	50
$r_3, \text{мм}^*$	15,55	18,26	21,02	23,69	26,46	29,21	32,26	35,28	38,83	42,15	45,68	49,47	53,35	57,08
$\delta_{пн2}, \text{мм}$	1,2	2,2	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,2	10,2	11,2	12,2	13,2	14,2
$\delta_{о}, \text{мм}$	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,7	2,7	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
$r_4, \text{мм}^{**}$	19,25	22,96	26,72	30,39	34,16	37,91	41,96	46,18	50,73	55,25	59,78	64,57	69,45	74,18

*Внешний радиус жилы кабеля и внешний радиус экрана кабеля рассчитываются с коэффициентами заполнения жилы и экрана равными 1.

**Толщина полупроводящих слоев по жиле, по изоляции, по экрану считается равным 0,2 мм.

Таблица П.9

Расчетные размерные данные кабелей 110 кВ отечественного производства

$S_{ж}, \text{мм}^2$	185	240	300	350	400	500	630	800	1000	1200
$r_1, \text{мм}^*$	7,67	8,74	9,77	10,56	11,28	12,62	14,16	15,96	17,84	19,54
$\delta_{ж}, \text{мм}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$\delta_{и}, \text{мм}$	16	16	16	16	15	15	15	15	15	15
$\delta_{пп1}, \text{мм}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$r_2, \text{мм}^{**}$	24,07	25,14	26,17	26,96	26,68	28,02	29,56	31,36	33,24	34,94
$S_{экp}, \text{мм}^2$	35	35	35	35	35	35	35	35	35	50
$r_3, \text{мм}^*$	24,30	25,36	26,38	27,16	26,89	28,21	29,75	31,53	33,41	35,17
$\delta_{пп2}, \text{мм}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$\delta_0, \text{мм}$	3	3	3,2	3,4	3,4	3,4	3,6	3,6	3,8	4
$r_4, \text{мм}^{**}$	27,50	28,56	29,78	30,76	30,49	31,81	33,55	35,33	37,41	39,37

*Внешний радиус жилы кабеля и внешний радиус экрана кабеля рассчитываются с коэффициентами заполнения жилы и экрана равными 1.

**Толщина полупроводящих слоев по жиле, по изоляции, по экрану считается равным 0,2 мм.

Таблица П.10

Расчетные размерные данные кабелей 220 кВ отечественного производства

$S_{ж}, \text{мм}^2$	400	500	630	800	1000	1200	1600	2000
$r_1, \text{мм}^*$	11,28	12,62	14,16	15,96	17,84	19,54	22,57	25,23
$\delta_{ж}, \text{мм}$	1,2	2,2	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2
$\delta_{и}, \text{мм}$	24	24	24	24	22	22	22	22
$\delta_{ип1}, \text{мм}$	1,2	2,2	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2
$r_2, \text{мм}^{**}$	37,68	41,02	44,56	48,36	50,24	53,94	58,97	63,63
$S_{экp}, \text{мм}^2$	265	265	265	265	265	265	265	265
$r_3, \text{мм}^*$	38,79	42,03	45,50	49,22	51,07	54,72	59,68	64,29
$\delta_{ип2}, \text{мм}$	1,2	2,2	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2
$\delta_о, \text{мм}$	4	4	4	4	4	4	4	4
$r_4, \text{мм}^{**}$	43,99	48,23	52,70	57,42	60,27	64,92	70,88	76,49

*Внешний радиус жилы кабеля и внешний радиус экрана кабеля рассчитываются с коэффициентами заполнения жилы и экрана равными 1.

**Толщина полупроводящих слоев по жиле, по изоляции, по экрану считается равным 0,2 мм.

Таблица П.11

Электрические погонные параметры кабелей 10 кВ отечественного производства.

$S_{ж}, \text{мм}^2$		50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200
$S_{экp}, \text{мм}^2$		16	16	16	16	25	25	25	25	35	35	35	35	35	50
$R_{ж}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$	М	3,50	2,50	1,84	1,46	1,17	0,95	0,73	0,58	0,44	0,35	0,28	0,22	0,18	0,15
	А	5,42	3,87	2,85	2,26	1,81	1,46	1,13	0,90	0,68	0,54	0,43	0,34	0,27	0,23
$R_{з}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$		10,94	10,94	10,94	10,94	7,00	7,00	7,00	7,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	3,50
$R_{з}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$		0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
$Dз, \text{м}^{**}$		1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127
$L_{ж}^*, \text{мкГн/м}$		2,51	2,48	2,45	2,42	2,40	2,38	2,35	2,33	2,30	2,28	2,26	2,23	2,21	2,19
$L_{з}^*, \text{мкГн/м}$		2,38	2,36	2,34	2,33	2,31	2,30	2,28	2,27	2,24	2,23	2,21	2,19	2,17	2,16
$M_{жз}^*, \text{мкГн/м}^{****}$		2,38	2,36	2,34	2,33	2,31	2,30	2,28	2,27	2,24	2,23	2,21	2,19	2,17	2,16
$M_{к}^*, \text{мкГн/м}$		2,08	2,07	2,06	2,05	2,04	2,03	2,02	2,00	1,99	1,98	1,96	1,94	1,93	1,91
$C_{жз}^*, \text{пФ/м}^{*****}$		199,45	225,97	254,04	278,47	304,54	331,77	369,68	406,27	459,79	506,86	561,42	624,78	691,16	751,14
$C_{жз}^*, \text{пФ/м}^{*****}$		464,38	499,42	536,94	569,89	611,72	648,45	699,94	749,92	828,53	893,06	905,79	987,34	1007,93	1084,89

* Активное сопротивление жилы рассчитывается при удельном сопротивлении жилы из меди $1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и из алюминия $2,71 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

** Глубина протекания тока рассчитывается с учетом удельного сопротивления грунта $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

*** Удельная взаимная индуктивность между жилой и соседним кабелем рассчитывается с учетом того, что кабели расположены в плоскости и расстояние в свету между кабелями равно диаметру кабеля.

**** Диэлектрическая проницаемость изоляции и диэлектрическая проницаемость оболочки для кабелей с изоляцией из СПЭ при 20°C принимается 2,4.

Таблица П.12

Электрические погонные параметры кабелей 20 кВ отечественного производства.

$S_{ж}, \text{мм}^2$		50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200
$S_{экр}, \text{мм}^2$		16	16	16	16	25	25	25	25	35	35	35	35	35	50
$R_{ж}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$	М	3,50	2,50	1,84	1,46	1,17	0,95	0,73	0,58	0,44	0,35	0,28	0,22	0,18	0,15
	А	5,42	3,87	2,85	2,26	1,81	1,46	1,13	0,90	0,68	0,54	0,43	0,34	0,27	0,23
$R_{з}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$		10,94	10,94	10,94	10,94	7,00	7,00	7,00	7,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	3,50
$R_{з}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$		0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
$Dз, \text{м}^{**}$		1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127
$L_{ж}^*, \text{мкГн/м}$		2,51	2,48	2,45	2,42	2,40	2,38	2,35	2,33	2,30	2,28	2,26	2,23	2,21	2,19
$L_{з}^*, \text{мкГн/м}$		2,33	2,31	2,30	2,29	2,28	2,27	2,25	2,24	2,22	2,20	2,19	2,17	2,15	2,14
$M_{жз}^*, \text{мкГн/м}^{***}$		2,33	2,31	2,30	2,29	2,28	2,27	2,25	2,24	2,22	2,20	2,19	2,17	2,15	2,14
$M_{к}^*, \text{мкГн/м}$		2,05	2,04	2,03	2,02	2,01	2,01	1,99	1,98	1,97	1,96	1,94	1,93	1,91	1,90
$C_{жз}^*, \text{пФ/м}^{****}$		147,01	164,58	183,08	199,13	216,20	234,00	258,72	282,53	317,30	347,83	383,18	424,19	467,11	505,87
$C_{жз}^*, \text{пФ/м}^{****}$		565,48	600,92	638,77	671,96	712,98	750,01	801,83	852,07	930,36	930,94	1001,12	1017,15	1097,49	1174,21

* Активное сопротивление жилы рассчитывается при удельном сопротивлении жилы из меди $1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и из алюминия $2,71 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

** Глубина протекания тока рассчитывается с учетом удельного сопротивления грунта $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

*** Удельная взаимная индуктивность между жилой и соседним кабелем рассчитывается с учетом того, что кабели расположены в плоскости и расстояние в свету между кабелями равно диаметру кабеля.

**** Диэлектрическая проницаемость изоляции и диэлектрическая проницаемость оболочки для кабелей с изоляцией из СПЭ при 20°C принимается 2,4.

Таблица П.13

Электрические погонные параметры кабелей 35 кВ отечественного производства.

$S_{ж}, \text{мм}^2$		50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200
$S_{экр}, \text{мм}^2$		16	16	16	16	25	25	25	25	35	35	35	35	35	50
$R_{ж}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$	М	3,50	2,50	1,84	1,46	1,17	0,95	0,73	0,58	0,44	0,35	0,28	0,22	0,18	0,15
	А	5,42	3,87	2,85	2,26	1,81	1,46	1,13	0,90	0,68	0,54	0,43	0,34	0,27	0,23
$R_{э}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$		10,94	10,94	10,94	10,94	7,00	7,00	7,00	7,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	3,50
$R_{з}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$		0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
$Dз, \text{м}^{**}$		1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141
$L_{ж}^*, \text{мкГн/м}$		2,51	2,48	2,45	2,42	2,40	2,38	2,35	2,33	2,30	2,28	2,26	2,24	2,21	2,19
$L_{э}^*, \text{мкГн/м}$		2,24	2,21	2,18	2,16	2,13	2,11	2,09	2,08	2,06	2,04	2,03	2,01	1,99	1,98
$M_{жэ}^*, \text{мкГн/м}^{***}$		2,24	2,21	2,18	2,16	2,13	2,11	2,09	2,08	2,06	2,04	2,03	2,01	1,99	1,98
$M_{к}^*, \text{мкГн/м}$		2,01	2,00	2,00	1,99	1,98	1,97	1,96	1,95	1,94	1,93	1,92	1,91	1,90	1,88
$C_{жэ}^*, \text{пФ/м}^{****}$		98,85	99,21	99,96	99,66	99,82	100,19	102,49	104,20	108,32	110,93	114,20	118,19	122,06	124,79
$C_{жз}^*, \text{пФ/м}^{****}$		625,37	582,68	556,22	535,80	522,50	511,91	507,70	495,75	499,20	493,10	496,13	500,99	505,99	509,32

* Активное сопротивление жилы рассчитывается при удельном сопротивлении жилы из меди $1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и из алюминия $2,71 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

** Глубина протекания тока рассчитывается с учетом удельного сопротивления грунта $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

*** Удельная взаимная индуктивность между жилой и соседним кабелем рассчитывается с учетом того, что кабели расположены в плоскости и расстояние в свету между кабелями равно диаметру кабеля.

**** Диэлектрическая проницаемость изоляции и диэлектрическая проницаемость оболочки для кабелей с изоляцией из СПЭ при 20°C принимается 2,4.

Таблица П.14

Электрические погонные параметры кабелей 110 кВ отечественного производства.

$S_{ж}, \text{мм}^2$		185	240	300	350	400	500	630	800	1000	1200
$S_{экв}, \text{мм}^2$		35	35	35	35	35	35	35	35	35	50
$R_{ж}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$	М	0,95	0,73	0,58	0,50	0,44	0,35	0,28	0,22	0,18	0,15
	А	1,46	1,13	0,90	0,77	0,68	0,54	0,43	0,34	0,27	0,23
$R_{з}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$		5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	3,50
$R_{з}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$		0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
$Dз, \text{м}^{**}$		1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127
$L_{ж}^*, \text{мкГн/м}$		2,38	2,35	2,33	2,32	2,30	2,28	2,26	2,23	2,21	2,19
$L_{з}^*, \text{мкГн/м}$		2,15	2,14	2,13	2,13	2,13	2,12	2,11	2,10	2,09	2,08
$M_{жз}^*, \text{мкГн/м}^{***}$		2,15	2,14	2,13	2,13	2,13	2,12	2,11	2,10	2,09	2,08
$M_{к}^*, \text{мкГн/м}$		1,96	1,95	1,94	1,94	1,94	1,93	1,92	1,91	1,90	1,88
$C_{жз}^*, \text{пФ/м}^{****}$		116,73	126,32	135,46	142,34	155,06	167,27	181,33	197,56	214,46	229,67
$C_{жз}^*, \text{пФ/м}^{****}$		1078,946	1123,08	1100,99	1072,22	1062,23	1111,3	1110,16	1172,96	1180,1	1183,03

*Активное сопротивление жилы рассчитывается при удельном сопротивлении жилы из меди $1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и из алюминия $2,71 \cdot 10^{-8}$ Ом·м

**Глубина протекания тока рассчитывается с учетом удельного сопротивления грунта 100 Ом·м

***Удельная взаимная индуктивность между жилой и соседним кабелем рассчитывается с учетом того, что кабели расположены в плоскости и расстояние в свету между кабелями равно диаметру кабеля.

****Диэлектрическая проницаемость изоляции и диэлектрическая проницаемость оболочки для кабелей с изоляцией из СПЭ при 20°C принимается 2,4.

Таблица П.15

Электрические погонные параметры кабелей 220 кВ отечественного производства.

$S_{ж}, \text{мм}^2$		400	500	630	800	1000	1200	1600	2000
$S_{экр}, \text{мм}^2$		265	265	265	265	265	265	265	265
$R_{ж}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$	М	0,44	0,35	0,28	0,22	0,18	0,15	0,11	0,09
	А	0,68	0,54	0,43	0,34	0,27	0,23	0,17	0,14
$R_{з}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$		0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
$R_{с}^*, \text{Ом/м} \cdot 10^{-4}$		0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
$Dз, \text{м}^{**}$		1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127
$L_{ж}^*, \text{мкГн/м}$		2,30	2,28	2,26	2,23	2,21	2,19	2,16	2,14
$L_{з}^*, \text{мкГн/м}$		2,06	2,04	2,03	2,01	2,00	1,99	1,97	1,96
$M_{жз}^*, \text{мкГн/м}^{****}$		2,06	2,04	2,03	2,01	2,00	1,99	1,97	1,96
$M_{к}^*, \text{мкГн/м}$		1,88	1,88	1,87	1,86	1,85	1,85	1,83	1,83
$C_{жз}^*, \text{пФ/м}^{****}$		110,67	113,19	116,42	120,37	128,90	131,45	138,95	144,27
$C_{жс}^*, \text{пФ/м}^{****}$		1060,77	969,922	908,412	866,104	805,761	780,778	775,922	768,067

*Активное сопротивление жилы рассчитывается при удельном сопротивлении жилы из меди $1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и из алюминия $2,71 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

**Глубина протекания тока рассчитывается с учетом удельного сопротивления грунта $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

***Удельная взаимная индуктивность между жилой и соседним кабелем рассчитывается с учетом того, что кабели расположены в плоскости и расстояние в свету между кабелями равно диаметру кабеля.

****Диэлектрическая проницаемость изоляции и диэлектрическая проницаемость оболочки для кабелей с изоляцией из СПЭ при 20°C принимается 2,4.