

Министерство образования и науки Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

С.П. Куксенко

**Электромагнитная совместимость:  
электроэнергетика**

Учебно-методическое пособие

Томск – 2017

**Куксенко С.П.**

Электромагнитная совместимость: электроэнергетика. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2017. – 265 с.

Представлены методические материалы практикума, посвященного изучению особенностей обеспечения и моделирования задач электромагнитной совместимости в электроэнергетике. Работы выполняются в программных продуктах TALGAT и ELCUT.

Предназначено для магистрантов технических вузов, специализирующихся в области электромагнитной совместимости.

Введение.....	4
1 Практические занятия.....	6
1.1 Электрическое поле промышленной частоты .....	6
1.2 Технические решения по системам ВЧ-связи.....	26
1.3 Расчет параметров линии электропередачи.....	49
1.4 Двухфазное короткое замыкание линии электропередачи.....	52
1.5 Расчет параметров кабельной линии .....	55
1.6 Оптический кабель на опоре линии электропередачи.....	57
1.7 Заземление.....	59
1.8 Рекомендации по диагностике состояния заземляющих устройств .....	117
1.9 Комплексное обследование заземляющего устройства подстанции ....	129
1.10 Восстановление системы заземления подстанции и последующая диагностика её заземляющего устройства.....	167
1.11 Проходной изолятор .....	184
1.12 Ограничитель перенапряжений .....	189
1.13 Поверхностный эффект и эффект близости.....	194
1.14 Защита объектов электроэнергетики от прямых ударов молнии.....	198
1.15 Внутренняя система молниезащиты .....	238
2 Самостоятельная работа .....	264
Список использованной литературы.....	265

## **Введение**

РФ располагает значительными запасами энергетических ресурсов и мощным ТЭК, включающим в себя добывающие отрасли (нефть, газ, уголь) и сектор электроэнергетики (электростанции, электрические сети), который является основой развития экономики и инструментом проведения политики.

Природные топливно-энергетические ресурсы, производственный, научно-технический и кадровый потенциалы ТЭК являются национальным достоянием, а его эффективное использование создает необходимые предпосылки для устойчивого развития экономики и обеспечивает рост уровня жизни населения. Согласно энергетической стратегии России на период до 2030 г. (распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р) предполагается замена основных фондов в электроэнергетике, модернизация тепловых, строительство новых атомных и гидрогенерирующих электростанций, а также выполнение работ по реконструкции и техническому перевооружению электрических сетей на основе обеспечивающих их надежное и эффективное функционирование новых электросетевых технологий и современного оборудования, в том числе за счет использования микропроцессорного (МП) оборудования при создании систем управления технологическими процессами, связи, релейной защиты и автоматики (РЗА), коммерческого учета электроэнергии и пр. В совокупности данные мероприятия направлены на обеспечение энергетической безопасности страны и регионов, удовлетворение потребностей экономики и населения страны в электрической энергии.

В Положении ПАО «РОССЕТИ» о единой технической политике в электросетевом комплексе указано, что защита технических средств (ТС) от воздействия внешних электрических и магнитных полей, а также помех по цепям питания должна быть достаточной для эффективного выполнения ТС своего назначения. Очевидно, что выполнение поставленных задач невозможно без учета требований ЭМС – способности одновременно функционировать в

реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии непреднамеренных электромагнитных помех и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим. Согласно стандартам ОАО «ФСК ЕЭС» по обеспечению экологической безопасности электросетевых объектов (СТО 56947007-29.240.043-2010, 56947007-29.240.044-2010) проведение работ по обследованию ЭМС на энергообъектах является обязательным условием на этапах их проектирования и технического перевооружения. Аналогичные стандарты добывающих отраслей – СТО Газпром 2-1.11-172-2007, 2-1.11-290-2009, 2-6.2-654-2012, ГОСТ Р 55154-2012.

Несмотря на наличие на объектах ТЭК систем молниезащиты, были аварии, вызванные молниевыми разрядами. Помимо прямых ударов молний возможны удары в близлежащие заземленные конструкции и объекты, что приводит к появлению так называемых «вторичных воздействий» молний. Их возможным последствием является выход из строя оборудования, линий связи и объектов в целом, приводящий к существенным материальным затратам. Известен случай аварийного отключения энергоблока тепловой электростанции из-за влияния на работу технологической защиты носимой коротковолновой радиостанции. Анализ аномалий работы РЗА подстанций показал, что свыше 15% их можно отнести к проблемам ЭМС. Так, при коротких замыканиях на шинах распределительных устройств подстанций и станций происходят повреждение кабелей вторичной коммутации и устройств РЗА, а также неправильная работа защит.

Таким образом, соответствовать требованиям нового времени может только качественно новый ТЭК: финансово устойчивый, экономически эффективный, динамично развивающийся, безопасный и оснащенный передовыми технологиями. Для этого необходима подготовка высококвалифицированных кадров по ЭМС.

## 1 Практические занятия

### 1.1 Электрическое поле промышленной частоты

#### 1.1.1 Влияния, создаваемые линиями электропередачи

В электрических цепях могут быть токи и напряжения постоянные по величине и направлению; постоянные по направлению, но переменные по величине; периодически изменяющиеся по величине и направлению; импульсного характера. Переменные токи и напряжения различной формы создают в пространстве, окружающем электрические цепи, переменные электрические и магнитные поля. Характер изменения этих полей соответствует характеру изменения электрического напряжения и тока в рассматриваемой цепи.

Если в проводе имеются переменные напряжения  $U$  и ток  $I$ , то электрическое поле можно представить (рисунок 1.1) в виде силовых линий, начинающихся в проводе и заканчивающихся на поверхности земли. В земле электрического поля, создаваемого напряжением провода  $U$ , нет, поэтому кабельные линии, проложенные в земле, электрическому влиянию не подвержены. Силовые линии магнитного поля, создаваемого током  $I$ , замыкаясь по концентрическим окружностям вокруг провода, проникают и в землю, поэтому кабельные линии в земле, так же как и воздушные, подвергаются воздействию магнитного поля.

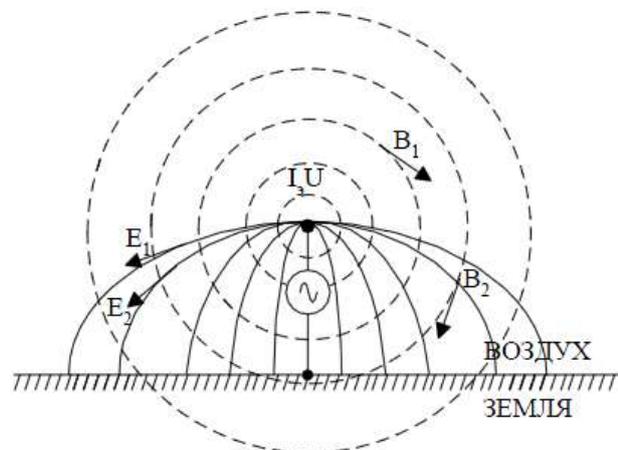


Рисунок 1.1 – Силовые линии электромагнитного поля

Трехфазные линии электропередачи (ЛЭП) переменного тока подразделяются на симметричные и несимметричные. На рисунке 1.2 представлены возможные схемы расположения проводов трехфазной ЛЭП в пространстве.

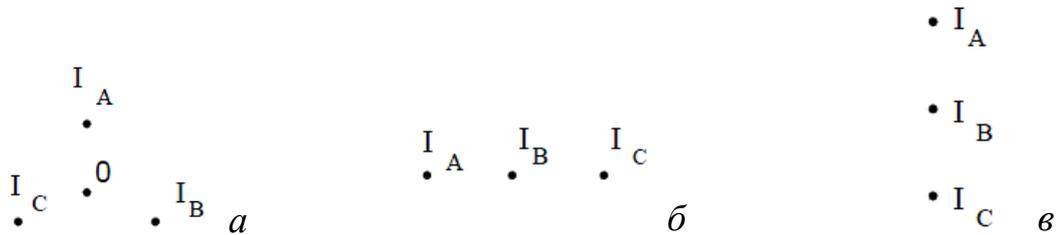
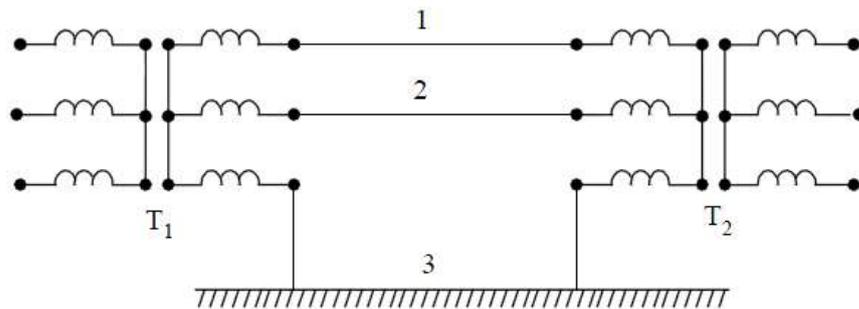


Рисунок 1.2 – Схемы расположения проводов симметричных трехфазных ЛЭП: по вершинам равностороннего треугольника (*а*); в одной горизонтальной (*б*) и в одной вертикальной (*в*) плоскостях

В схеме, изображенной на рисунке 1.2*а*, суммарный вектор магнитной индукции в центре треугольника (точка 0) в любой момент времени (при симметричных токах  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ) будет равен нулю. В схемах на рисунке 1.2*б* и 1.2*в* это условие не соблюдается ни в одной точке пространства, но при близости расположения проводов друг к другу эта схема практически тоже симметрична. Пример несимметричной ЛЭП трехфазного тока приведен на рисунке 1.3.



$T_1$  и  $T_2$  – повышающий и понижающий трансформаторы; 1 и 2 – провода ЛЭП; 3 – земля

Рисунок 1.3 – Схема несимметричной трехфазной ЛЭП:

Так как расстояние между каждым проводом 1 и 2 и землей намного больше, чем расстояние между проводами 1 и 2, эта линия относится к несимметричным. Несимметрия такой ЛЭП с точки зрения влияния на смежные сооружения усугубляется тем, что ток, протекающий в земле, может

находиться от поверхности земли на глубине нескольких сотен метров.

Для анализа электрического поля ЛЭП и электроустановок промышленной частоты вообще можно применять законы электростатики. Поле создается, по крайней мере, между двумя электродами (телами), которые несут заряды разных знаков и на которых начинаются и оканчиваются силовые линии. Создаваемое электроустановками поле неравномерно, т.е. напряженность его изменяется вдоль силовых линий несимметрично, поскольку возникает между электродами различной формы, например между токоведущей частью и землей или металлической заземленной конструкцией. Поле ЛЭП можно считать, кроме того, плоскопараллельным, т.е. форма его одинакова в параллельных плоскостях, называемых плоскостями поля. В данном случае плоскости поля перпендикулярны оси линии.

В разных точках пространства вблизи электроустановок промышленной частоты напряженность электрического поля имеет разные значения. Она зависит от ряда факторов: номинального напряжения электроустановки; расстояния между точкой, в которой определяется напряженность поля, и токоведущими частями; высоты размещения над землей токоведущих частей и интересующей нас точки и т.п. Напряженность может быть измерена с помощью специальных приборов. В некоторых случаях, например вблизи ВЛ, она определяется расчетным путем.

В качестве примера рассмотрим порядок определения напряженности электрического поля, создаваемого трехфазной ВЛ с горизонтальным расположением проводов. Для упрощения примем допущение, что линия не имеет грозозащитных тросов или они изолированы от опор, что позволяет использовать их, например, для отбора мощности. В результате тросы не оказывают существенного влияния на электрическое поле проводов. При этом расчетные значения напряженности поля будут завышенными по сравнению с фактическими, что в итоге ужесточает требования безопасности и поэтому допустимо.

Напряженность электрического поля уединенного бесконечно длинного

прямолинейного проводника, заряженного равномерно по длине, выражается зависимостью, В/м:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 m},$$

где  $\tau$  – линейная плотность заряда провода, Кл/м;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;  $m$  – кратчайшее расстояние от провода до точки, в которой определяется напряженность, м.

Известно также, что вектор напряженности электрического поля  $E$  совпадает с линией, соединяющей интересующую нас точку с проводником по кратчайшему расстоянию. При этом, если проводник несет положительный заряд, то вектор напряженности  $E$  направлен от проводника, а при отрицательном заряде – к проводнику.

Пусть в рассматриваемом примере провода ЛЭП, которые приняты бесконечно длинными прямолинейными проводниками, расположены вблизи плоской поверхности проводящей среды – земли. Поэтому поле линии будет создаваться не только зарядами проводов, но и зарядами их зеркальных изображений. При этом вектор напряженности суммарного поля будет равен геометрической сумме векторов напряженностей полей всех зарядов.

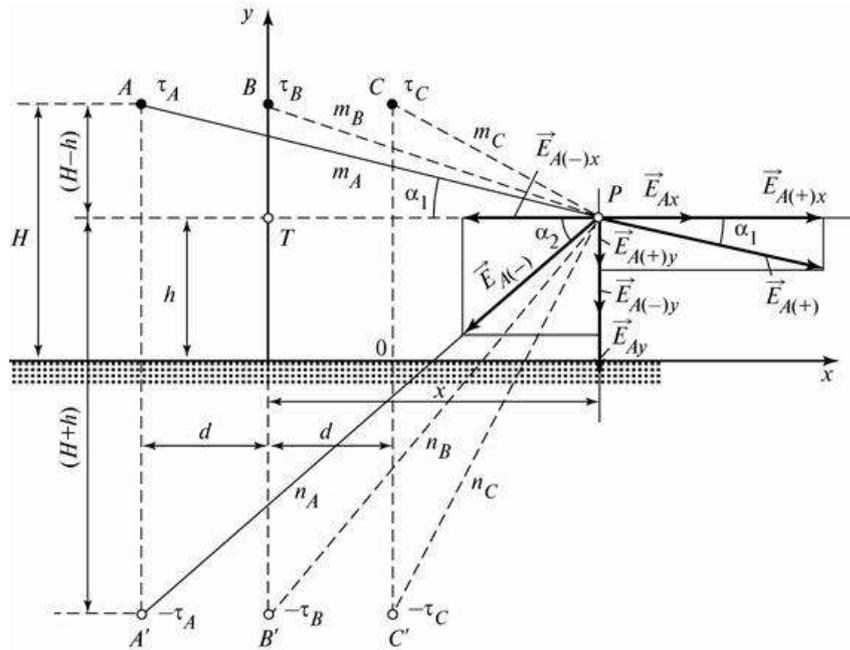
Рассмотрим вначале одну фазу, например фазу  $A$  (рисунок 1.4), приняв заряд провода положительным  $+\tau_A$ , а заряд его зеркального изображения отрицательным  $-\tau_A$ . Модуль (т.е. длина, абсолютное значение) вектора напряженности электрического поля в некоторой  $P$ , обусловленного зарядом  $+\tau_A$ , В/м:

$$E_{A(+)} = \frac{\tau_A}{2\pi\epsilon_0 m_A}, \quad (1.1)$$

а зарядом  $-\tau_A$ ,

$$E_{A(-)} = \frac{\tau_A}{2\pi\epsilon_0 n_A}. \quad (1.2)$$

Здесь  $m_A$  и  $n_A$  – кратчайшие расстояния от точки  $P$  до провода (фазы)  $A$  и его зеркального изображения соответственно, м.



$A, B, C$  – фазы (провода) линии;  $A', B', C'$  – их зеркальные изображения;  
 $m_A, m_B, m_C$  – кратчайшие расстояния от точки  $P$  до фаз линий;  
 $n_A, n_B, n_C$  – кратчайшие расстояния от точки  $P$  до зеркальных изображений фаз

Рисунок 1.4 – Вычисление напряженности электрического поля вблизи воздушной линии электропередачи в точке  $P$

Теперь разложим векторы  $E_{A(+)}$  и  $E_{A(-)}$  на их составляющие по горизонтали  $E_{A(+),x}$ ,  $E_{A(-),x}$  и вертикали  $E_{A(+),y}$ ,  $E_{A(-),y}$  (см. рисунок 1.4). Модули этих векторов, как следует из построения, равны, В/м:

$$E_{A(+),x} = E_{A(+)} \cos \varphi_1 = \frac{E_{A(+)}(x+d)}{m_A};$$

$$E_{A(-),x} = E_{A(-)} \cos \varphi_2 = \frac{E_{A(-)}(x+d)}{n_A};$$

$$E_{A(+),y} = E_{A(+)} \sin \varphi_1 = \frac{E_{A(+)}(H-h)}{m_A};$$

$$E_{A(-),y} = E_{A(-)} \sin \varphi_2 = \frac{E_{A(-)}(H+h)}{n_A},$$

где  $x$  – расстояние по горизонтали от оси линии до точки  $P$ ;  $d$  – расстояние между осями соседних проводов;  $H$  – высота размещения провода над землей (при более точных расчетах – над проводящим слоем грунта);  $h$  – высота точки  $P$  над землей (все расстояния в метрах).

Путем сложения векторов  $E_{A(+x)}$  и  $E_{A(-x)}$ , а также  $E_{A(+y)}$  и  $E_{A(-y)}$ , получим векторы  $E_{Ax}$  и  $E_{Ay}$ , которые являются соответственно горизонтальной и вертикальной составляющими вектора напряженности поля фазы  $A$  (с учетом ее зеркального изображения) в точке  $P$ . Векторы  $E_{A(+x)}$  и  $E_{A(-x)}$  имеют противоположные направления, поэтому модуль их суммарного вектора  $E_{Ax}$  равен разности их модулей:

$$E_{Ax} = E_{A(+)} \frac{x+d}{m_A} - E_{A(-)} \frac{x+d}{n_A}.$$

Модуль вектора  $E_{Ay}$  равен сумме модулей векторов  $E_{A(+y)}$  и  $E_{A(-y)}$ , поскольку они направлены в одну сторону:

$$E_{Ay} = E_{A(+)} \frac{x+d}{m_A} + E_{A(-)} \frac{x+d}{n_A}.$$

Заменяя  $E_{A(+)}$  и  $E_{A(-)}$  их значениями из (1.1) и (1.2), получим

$$E_{Ax} = \frac{\tau_A}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{x+d}{m_A^2} - \frac{x+d}{n_A^2} \right);$$

$$E_{Ay} = \frac{\tau_A}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{H-h}{m_A^2} + \frac{H-h}{n_A^2} \right).$$

Поскольку рассматривается ЛЭП переменного тока, то заряд и напряженности электрического поля являются синусоидальными функциями времени, то их можно записать в комплексной форме. Учитывая, что

$$\dot{\tau}_A = C_A \dot{U}_A,$$

произведем замену в уравнениях, представленных выше, в результате чего получим окончательные выражения в комплексной форме для горизонтальной и вертикальной составляющих вектора напряженности поля фазы  $A$  (с учетом ее зеркального изображения) в точке  $P$ :

$$\dot{E}_{Ax} = \frac{C_A \dot{U}_A}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{x+d}{m_A^2} - \frac{x+d}{n_A^2} \right) = \frac{C_A \dot{U}_A}{2\pi\epsilon_0} k_1;$$

$$\dot{E}_{Ay} = \frac{C_A \dot{U}_A}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{H-h}{m_A^2} + \frac{H+h}{n_A^2} \right) = \frac{C_A \dot{U}_A}{2\pi\epsilon_0} k_2,$$
(1.3)

где  $C_A$  – емкость фазы  $A$  относительно земли, Ф/м;  $\dot{U}_A$  – напряжение фазы  $A$  относительно земли (эффективное значение фазного напряжения), В;  $k_1, k_2$  – коэффициенты.

Аналогично можно получить выражения для горизонтальных и вертикальных составляющих напряженностей полей двух других фаз  $B$  и  $C$ .

Горизонтальная и вертикальная составляющие напряженности суммарного поля, В/м, которые обусловлены зарядами всех фаз линии и их зеркальными изображениями, равны

$$\dot{E}_x = \dot{E}_{Ax} + \dot{E}_{Bx} + \dot{E}_{Cx};$$

$$\dot{E}_y = \dot{E}_{Ay} + \dot{E}_{By} + \dot{E}_{Cy}.$$

Подставим в эти уравнения соответствующие значения из (1.3). Учитывая то, что для линий с горизонтальным расположением проводов

$$C_A = C_B = C_C = C,$$

а также то, что для симметричной трехфазной системы

$$\dot{U}_A = U_\phi; \dot{U}_B = a^2 U_\phi; \dot{U}_C = a U_\phi,$$

где  $U_\phi$  – фазное напряжение линии, В;  $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$  – оператор, напряженность электрического поля, В/м, трехфазной ЛЭП электропередачи с горизонтальным расположением проводов можно получить из равенства:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

или

$$E = \frac{CU_\phi}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{(2k_1 - k_3 - k_5)^2 + 3(k_3 - k_5)^2 + (2k_2 - k_4 - k_6)^2 + 3(k_4 - k_6)^2},$$

$$\text{где } k_1 = \frac{x+d}{m_A^2} - \frac{x+d}{n_A^2}; k_2 = \frac{H-h}{m_A^2} + \frac{H+h}{n_A^2}; k_3 = \frac{x}{m_e^2} - \frac{x}{n_e^2}; k_4 = \frac{H-h}{m_B^2} + \frac{H+h}{n_B^2};$$

$$k_5 = \frac{x-d}{m_C^2} - \frac{x-d}{n_C^2}; k_6 = \frac{H-h}{m_C^2} + \frac{H+h}{n_C^2}.$$

Отрезки  $m$  и  $n$  являются гипотенузами соответствующих прямоугольных треугольников (см. рисунок 1.4) и определяются следующими уравнениями, м:

$$m_A = \sqrt{(x+d)^2 + (H-h)^2}; n_A = \sqrt{(x+d)^2 + (H+h)^2};$$

$$m_B = \sqrt{x^2 + (H-h)^2}; n_B = \sqrt{x^2 + (H+h)^2};$$

$$m_C = \sqrt{(x-d)^2 + (H-h)^2}; n_C = \sqrt{(x-d)^2 + (H+h)^2}.$$

Высота расположения провода над землей  $H$  должна приниматься равной фактической высоте размещения участка (точки) провода, ближайшего к точке  $P$ , поскольку на формирование поля в этой точке основное влияние оказывает ближайший участок провода (рисунок 1.5). Эта высота,  $H$ , определяется из выражения

$$H = H_n - \frac{4fx}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right),$$

где  $H$  – высота крепления провода на опоре, м;  $f = H_n - H$  – стрела провеса провода, м,  $H_0$  – габарит линии (наименьшее расстояние от проводов до земли), м;  $x$  – расстояние по горизонтали от опоры до интересующей точки  $A$  провода, м;  $l$  – длина пролета линии, м.

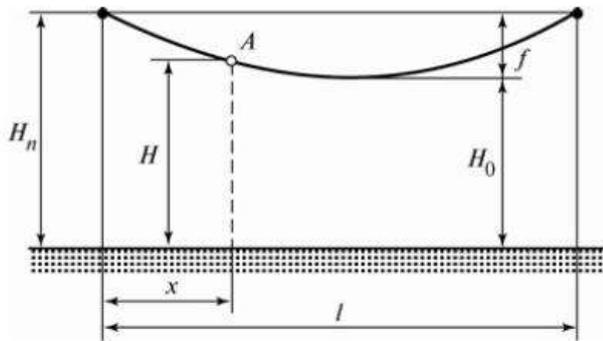


Рисунок 1.5 – Определение высоты размещения провода над землей  $H$  на расстоянии  $x$  от опоры

Емкость фазы трехфазной линии с горизонтальным расположением проводов относительно земли на единицу длины линии  $C$ , Ф/м, определяется следующим известным выражением:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2H_{cp}d}{r^3 \sqrt{(4H_{cp}^2 + d^2)} \sqrt{H_{cp}^2 + d^2}}}, \quad (1.4)$$

где  $H_{cp}$  – средняя высота подвеса проводов над поверхностью земли, м:

$$H_{\text{cp}} = H_{\text{п}} - \frac{2f}{3} = \frac{H_{\text{п}} + 2H_0}{3}.$$

Пренебрегая влиянием земли, т.е. полагая  $H_{\text{cp}} \gg d$ , получим упрощенное выражение, Ф/м:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{d\sqrt[3]{2}}{r}}, \quad (1.5)$$

где  $r$  – радиус провода, м.

При расщепленных фазах, состоящих из  $n$  проводов радиусом  $r_0$  каждая, при расстоянии между ними (шаг расщепления)  $a$ , вместо  $r$  в (1.4) и (1.5) подставим эквивалентный радиус  $r_{\text{эКВ}}$ , м:

$$r_{\text{эКВ}} = P \sqrt[n]{r_0 a^{n-1}},$$

$P$  – поправочный коэффициент. При  $n = 2$  и  $3$  коэффициент  $P = 1$ , а  $n = 4$  –  $P = 1,09$ .

### 1.1.2 Воздействие на биологические объекты

Эффект воздействия электромагнитного поля на биологический объект принято оценивать количеством электромагнитной энергии, поглощаемой объектом при нахождении его в поле. Допустимо считать, что при малых частотах, в том числе 50 Гц, электрическое и магнитное поля не связаны, поэтому их рассматривают отдельно, как и оказываемые ими влияния на биологический объект.

Механизм биологического действия электрического поля на организм человека изучен недостаточно. Предполагается, что нарушение регуляции физиологических функций организма обусловлено воздействием поля на различные отделы нервной системы. При этом повышение возбудимости центральной нервной системы происходит вследствие рефлекторного действия поля, а тормозной эффект – результат прямого воздействия поля на структуры головного и спинного мозга. Считается, что кора головного мозга, а также промежуточный мозг особенно чувствительны к воздействию электрического

поля. Предполагается также, что основным материальным фактором, вызывающим указанные изменения в организме, является индуцируемый в теле ток. При этом влияние самого электрического поля значительно меньше.

Наряду с биологическим действием электрическое поле обуславливает возникновение разрядов между человеком и металлическим предметом, имеющим иной, чем человек, потенциал. Если человек стоит непосредственно на земле или на токопроводящем заземленном основании, то потенциал его тела практически равен нулю. В том случае, когда человек изолирован от земли, его тело может оказаться под некоторым потенциалом, достигающим иногда нескольких киловольт.

Прикосновение человека, изолированного от земли, к заземленному металлическому предмету или человека, имеющего контакт с землей, к изолированному от земли металлическому предмету сопровождается прохождением через человека в землю разрядного тока, который может вызвать болезненные ощущения. Такие прикосновения, как правило, сопровождаются искровым разрядом.

В случае прикосновения к изолированному от земли металлическому предмету большой протяженности (трубопровод, проволочная ограда на деревянных стойках и т.п.) или большой площади (крыша деревянного здания и пр.) ток, проходящий через человека, может достигать значений, опасных для жизни.

Через тело человека, находящегося вблизи действующих электроустановок переменного тока, т.е. в области создаваемого ими электрического поля, постоянно проходит в землю ток. При этом, если человек не изолирован от земли, т.е. стоит в токопроводящей обуви непосредственно на земле или проводящем основании, соединенном с ней, ток будет стекать в землю через площадь соприкосновения человека с землей. Если же человек изолирован от земли (стоит на сухой доске, имеет на ногах изолирующую (резиновую) обувь, поднимается по деревянной опоре ЛЭП и т.п.), ток в землю будет стекать через емкостную связь между телом человека и землей.

В обоих случаях при условии, что человек находится на одном и том же месте и не слишком высоко над землей, значения тока практически одинаковы. Значение тока, проходящего через человека, зависит от номинального напряжения электроустановки, места нахождения человека относительно токоведущих частей и земли и ряда других факторов.

Найдем выражение для этого тока, обозначив его через  $I_h$  для случая, когда человек стоит непосредственно на земле в токопроводящей обуви. Предварительно примем следующие условия и допущения:

- тело человека представляем равной ему по высоте и объему половиной вытянутого эллипсоида вращения (овоида) с полуосями  $a$  и  $b$ , стоящей на земле так, что большая полуось его перпендикулярна поверхности земли (рисунок 1.6);
- материал эллипсоида однородный, его электрическая проводимость равна средней проводимости тела человека;
- первоначально считаем, что полуэллипсоид выполнен из непроводящего материала с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ ;
- электрическое поле до внесения в него полуэллипсоида является однородным, и результирующее поле внутри непроводящего полуэллипсоида также однородно;
- вектор напряженности внешнего электрического поля  $E$  направлен вертикально, т.е. вдоль большой полуоси эллипсоида.

Размеры полуэллипсоида, эквивалентного телу человека, определим из условия, что они соответствуют высоте и объему тела человека среднего роста:  $l_h = 1,7$  м и  $V_h = 0,068$  м<sup>3</sup>. Тогда длина большой полуоси  $a$  равна 1,7 м, а длина малой полуоси  $b$  определяется из равенства

$$V_h = \frac{2}{3} \pi a b^2, \quad (1.6)$$

и составляет  $b = 0,14$  м. При этом выражение для расчета тока, проходящего через человека, имеет вид

$$I_h = E\epsilon_0 \frac{\pi b^2 \omega}{N_a}, \quad (1.7)$$

где  $N_a$  – коэффициент деполяризации эллипсоида вращения вдоль оси вращения (т.е. оси  $a$ ):

$$N_a = \frac{b^2}{a^2} \left( \ln \frac{2a}{b} - 1 \right). \quad (1.8)$$

Подставив (1.8) в (1.7), получим

$$I_h = E\epsilon_0 \frac{\pi a^2 \omega}{\ln \frac{2a}{b} - 1}. \quad (1.9)$$

Тогда для человека среднего роста значение тока равно  $I_h = 11,4 \cdot 10^{-6} E$ .

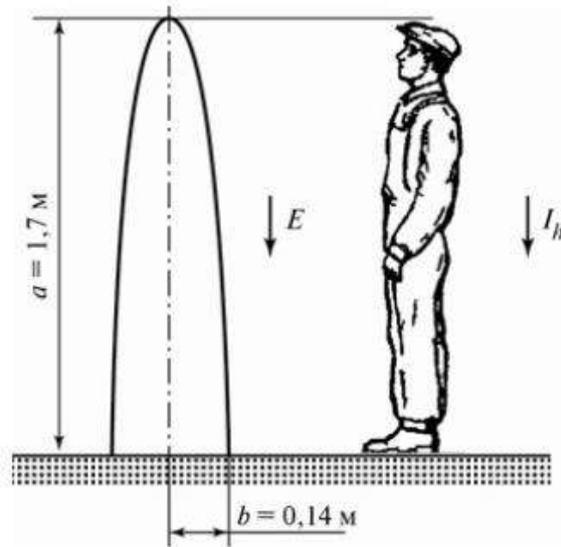


Рисунок 1.6 – Размещение на земле в электрическом поле половины эллипсоида вращения, эквивалентной по объему и высоте телу человека среднего роста

Можно получить выражение для мощности электрического поля  $P_h$ , Вт, поглощаемой полуэллипсоидом, т.е. телом человека. Эта мощность, выраженная через плотность тока в полуэллипсоиде  $J$ , А/м<sup>2</sup>, его объем  $V_h$ , м<sup>3</sup>, и удельное сопротивление тела  $\rho$ , Ом·м, равна

$$P_h = J^2 V_h \rho.$$

Полагая, с некоторым допущением, что

$$J = \frac{I_h}{S},$$

где  $S = \pi b^2$  – площадь основания полуэллипсоида,  $\text{м}^2$ , и с учетом (1.6), получим

$$P_h = I_h^2 \frac{2ap}{3\pi b^2} = \frac{2\pi ab^2 \rho \omega^2 E^2 \varepsilon_0^2}{3 N_a^2}.$$

Степень отрицательного воздействия электрического поля промышленной частоты на организм человека можно оценить по количеству поглощаемой телом человека энергии электрического поля, потоку, проходящему через человека в землю, и, наконец, по напряженности поля в месте, где находится человек. Все эти величины связаны между собой простыми математическими зависимостями, поэтому безразлично, какую из них принять за основу при нормировании по условиям безопасности для человека. Однако с точки зрения привычных представлений о физической сущности явлений, возникающих в теле человека как в проводнике, находящемся в электрическом поле, целесообразно при исследовании воздействия электрического поля на организм, а также при соответствующих расчетах использовать электрический ток, проходящий через человека. Но как критерий безопасности для человека, находящегося в электрическом поле промышленной частоты, необходимо использовать напряженность поля в месте нахождения человека. Дело в том, что значения тока, проходящего через человека, а следовательно, и энергии, поглощаемой его телом, зависят от положения тела относительно источника поля. При изменении положения тела (человек повернулся боком, наклонился и т.п.) значение тока может измениться в 1,5–2 раза, а энергии – в 2–4 раза при практически сохранившейся интенсивности биологического воздействия поля на человека. Кроме того, в производственных условиях напряженность поля значительно проще измерить, чем ток, проходящий через человека, и энергию, поглощаемую телом.

Допустимое значение тока, длительно проходящего через человека и обусловленного воздействием электрического поля, как показали исследования и опыт работы в электроустановках, составляет примерно 50–60 мкА, что соответствует напряженности электрического поля на высоте роста человека примерно 5 кВ/м. Установлено также, что если при электрических разрядах,

возникающих в момент прикосновения человека к металлической конструкции, имеющей иной, чем человек, потенциал, установившийся ток не превышает 50–60 мкА, то человек, как правило, не испытывает болевых ощущений.

Гигиенические нормы времени пребывания человека без средств защиты в электрическом поле электроустановок промышленной частоты установлены действующими правилами в зависимости от напряженности поля в зоне, где будет находиться человек, т.е. от напряженности поля, не искаженного присутствием человека (таблица 1.1). Эти нормы обязательны для персонала, обслуживающего электроустановки 50 Гц сверхвысокого напряжения – 330 кВ и выше.

Таблица 1.1 – Нормы времени пребывания человека в электрическом поле электроустановок промышленной частоты в течение одних суток

Напряженность электрического поля, кВ/м, включительно	Допустимое время пребывания человека в поле, мин
до 5	не ограничивается
свыше 5 до 10	не более 180
свыше 10 до 15	не более 90
свыше 15 до 20	не более 10
свыше 20 до 25	не более 5

Примечания:

1. При промежуточных значениях напряженности электрического поля следует ориентироваться на приведенное в таблице ближайшее значение.
2. Нормативы действительны при условии, что остальное время человек находится в местах, где напряженность электрического поля меньше или равна 5 кВ/м.

Согласно нормам пребывание персонала без средств защиты в электрическом поле напряженностью до 5 кВ/м включительно может быть сколь угодно длительным. При большей напряженности вплоть до 25 кВ/м включительно продолжительность пребывания в поле ограничивается. Если требуется большая продолжительность пребывания в поле, чем указано в таблице или если напряженность поля на рабочем месте превышает 25 кВ/м, работы должны проводиться с применением средств защиты от воздействия поля – экранирующих костюмов или экранирующих устройств.

### 1.1.3 Задачи для решения

**Задача 1.** Человек, находящийся вблизи действующей электроустановки, оказывается в области создаваемого ею электрического поля, которое при

определенной интенсивности вредно для здоровья людей. Вместе с тем, электрическое поле обуславливает возникновение электрического тока, стекающего в землю через тело человека и также являющегося отрицательным фактором. Вредное воздействие на здоровье людей ограничивается предельно допустимыми уровнями напряженности электрического поля. В то же время, для оценки степени влияния электрического поля следует проводить расчет тока, проходящего через человека.

Дано. Рост человека (подростка)  $a = 1,2$  м, масса тела  $G = 43$  кг, плотность тела человека (среднее значение)  $\rho_{\text{ч}} = 1,05$  г/см<sup>3</sup>.

Требуется рассмотреть частный случай – определить значение тока, стекающего в землю через тело человека (подростка), находящегося вблизи ЛЭП сверхвысокого напряжения, где напряженность электрического поля на уровне роста этого человека достигает  $E = 15$  кВ/м. Решение выполнить, используя точное и приближенное значения коэффициента деполяризации эллипсоида  $N_a$  (получить два значения тока, проходящего через человека –  $I_{h1}$  и  $I_{h2}$ ).

Указания (допущения). Заменить тело человека равной ему по высоте и объему половиной вытянутого эллипсоида вращения (овоида) с полуосями  $a$  и  $b$ , стоящей на земле так, что большая его полуось перпендикулярна поверхности земли; принять материал эллипсоида однородным с электрической проводимостью, равной средней электрической проводимости тела человека (вначале следует считать, что полуэллипсоид выполнен из непроводящего материала с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ ); полагать, что электрическое поле до внесения в него полуэллипсоида было однородным, поэтому результирующее поле внутри непроводящего полуэллипсоида также будет однородным; считать, что вектор напряженности внешнего электрического поля  $E$  направлен вертикально, т.е. по большой полуоси эллипсоида.

Решение. Сначала определим размеры эллипсоида. Размеры половины эллипсоида, эквивалентного телу человека, найдем, зная высоту и объем тела

человека:

$$V_h = \frac{2\pi ab^2}{3}, \quad b = \sqrt{\frac{3V_h}{2\pi a}},$$

$$V_h = \frac{G}{\rho_{\text{п}}} = \frac{43}{1,05 \cdot 10^3} = 4,09 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3, \quad b = \sqrt{\frac{3 \cdot 4,09 \cdot 10^{-2}}{2\pi \cdot 1,2}} = 0,127 \text{ м}.$$

Как известно из основ электротехники, при этих условиях напряженность поля внутри диэлектрика (полуэллипсоида)  $E_r$  определяется как

$$E_r = E - \frac{P_r N_a}{\epsilon_0},$$

где  $P_r$  – поляризованность диэлектрика, Кл/м<sup>2</sup>:

$$P_r = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)E_r,$$

$N_a$  – коэффициент деполяризации эллипсоида вращения вдоль оси вращения (т.е. оси  $a$ ), равный

$$N_a = \frac{\frac{k}{\sqrt{k^2 - 1}} \ln(k + \sqrt{k^2 - 1}) - 1}{k^2 - 1}.$$

Здесь  $k = a/b = 1,2/0,127 = 9,45$  – отношение полуосей эллипсоида. Подставив значение  $k$  в формулу для  $N_a$ , получим точное значение коэффициента деполяризации:

$$N_{\text{ат}} = \frac{\frac{9,45}{\sqrt{9,45^2 - 1}} \ln(9,45 + \sqrt{9,45^2 - 1}) - 1}{9,45^2 - 1} = 0,0223.$$

При большом значении  $k$  можно принять  $\sqrt{k^2 - 1} = k$ . Тогда  $N_a = \frac{b^2 \left( \ln \frac{2a}{b} - 1 \right)}{a^2}$ ,

$$N_{\text{ап}} = \frac{0,127^2 \left( \ln \frac{2 \cdot 1,2}{0,127} - 1 \right)}{1,2^2} = 0,0219 \text{ – приближенное значение коэффициента}$$

деполяризации. После соответствующих подстановок, получим

$$E_r = \frac{E}{1 + N_a(\epsilon_r - 1)}, \quad (1.10)$$

и электрическое смещение (электрическая индукция) в диэлектрике, Кл/м<sup>2</sup>:

$$D_r = \epsilon_0 \epsilon_r E_r. \quad (1.11)$$

На полуэллипсоиде, находящемся в электрическом поле, индуцируется некоторый заряд, значение которого нам неизвестно. Выражение для мгновенного значения этого заряда  $q$ , Кл, имеет следующий вид:

$$q = -Q_{\max h} \cos(\omega t).$$

Дифференцируя  $q$  по времени, получаем выражение для мгновенного значения тока, стекающего с эллипсоида,  $i_h$ , А:

$$i_h = \frac{dq}{dt} = Q_{\max h} \omega \sin(\omega t).$$

Вместе с тем известно, что  $i_h = I_{\max h} \sin(\omega t)$ , откуда

$$I_{\max h} = \omega Q_{\max h} \text{ или } I_h = \omega Q_h, \quad (1.12)$$

где  $Q_{\max h}$  и  $Q_h$  – максимальное и действующее (эффективное) значения заряда, индуцированного на полуэллипсоиде, Кл;  $\omega$  – угловая частота, Гц;  $I_{\max h}$  и  $I_h$  – максимальное и действующее (эффективное) значения тока, стекающего с полуэллипсоида в землю, А.

Заряд  $Q_h$  можно определить из выражения

$$Q_h = \int_S \sigma dS, \quad (1.13)$$

где  $S$  – площадь поверхности полуэллипсоида, м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – поверхностная плотность заряда полуэллипсоида, Кл/м<sup>2</sup>.

Далее переходим к решению задачи с проводящим полуэллипсоидом. Поскольку электрическое смещение в любой точке диэлектрика, непосредственно примыкающей к поверхности проводящего тела, численно равно плотности заряда на поверхности этого тела, т.е.  $D_r = \sigma$ , решив совместно (1.10), (1.11) и (1.13), получим

$$Q_h = \oint_S \frac{E\varepsilon_0}{\frac{1}{\varepsilon_r} + N_a \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_r}\right)} dS.$$

Так как для проводящего материала можно принять  $\varepsilon_r \rightarrow \infty$ , то после интегрирования по площади основания полуэллипсоида  $S = \pi b^2$ , имеем

$$Q_h = E\varepsilon_0 \frac{\pi b^2}{N_a}. \quad (1.14)$$

Подставив (1.14) в (1.12), получим искомое выражение для тока, проходящего через человека:

$$I_h = E\varepsilon_0 \frac{\pi b^2 \omega}{N_a}.$$

Подстановка в полученное выражение тока точного и приближенного значений коэффициента деполяризации дает значения тока:

для точного  $N_{ат}$ :

$$I_{h1} = 15 \cdot 10^3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\pi 0,127^2 \cdot 314}{0,0221} = 95,72 \text{ мкА};$$

для приближенного  $N_{ап}$ :

$$I_{h2} = 15 \cdot 10^3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\pi 0,127^2 \cdot 314}{0,0217} = 97,51 \text{ мкА}.$$

**Задача 2.** Известно, что вблизи электроустановок промышленной частоты (50 Гц) сверхвысокого и ультравысокого напряжения – 330 кВ и выше (ЛЭП, подстанций, распределительных устройств и др.) возникает интенсивное электрическое поле, вредное для здоровья людей. Поэтому существующие нормы ограничивают длительность пребывания людей в электрическом поле в зависимости от его напряженности и от категории людей (персонал, обслуживающий электроустановки; сельскохозяйственный персонал; население). При необходимости нахождения людей в электрическом поле напряженностью  $E$  выше допустимого значения или большей продолжительности, чем предусмотрено нормами, требуется применение защитных средств – экранирующих костюмов, экранов (см. рисунок 1.7) и др.

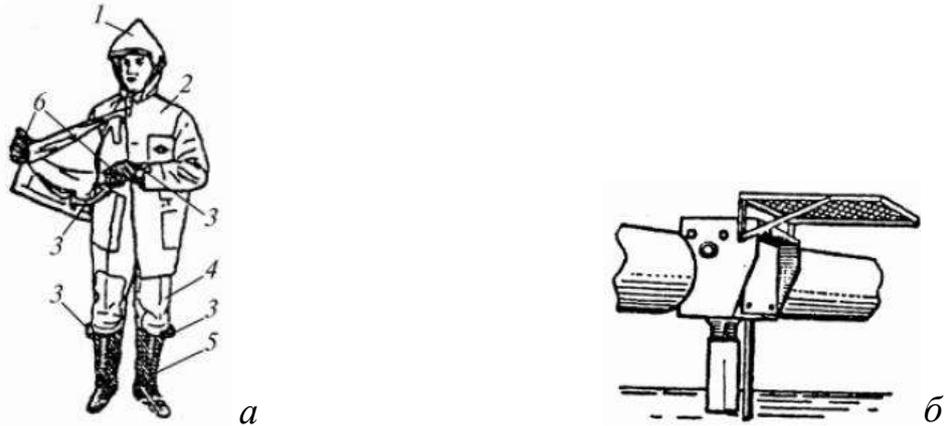


Рисунок 1.7 – Защитные средства: *а* – экранирующий костюм из токопроводящей ткани для защиты от вредного воздействия электрического поля промышленной частоты (50 Гц): 1 – капюшон; 2 – куртка; 3 – проводники, соединяющие отдельные элементы костюма; 4 – брюки; 5 – сапоги; 6 – перчатки; *б* – экранирующий козырек (экран) над шкафом управления выключателем 500 кВ

В открытом распредустройстве 500 кВ предстоит плановая работа на ряде участков с повышенной напряженностью  $E$  электрического поля. Работа будет проводиться без применения защитных средств – экранов, экранирующих костюмов и пр. Продолжительность работы зависит от ее объема и составляет:

60 мин на участке 1, где  $E = 10$  кВ/м;

90 мин на участке 2, где  $E = 8$  кВ/м.

Требуется вычислить наибольшее допустимое время выполнения работ для третьего участка, где  $E = 6$  кВ/м, имея в виду, что приведенное время, эквивалентное по биологическому эффекту времени пребывания человека в электрическом поле, не должно превышать 8 ч в течение рабочего дня.

**Задача 3.** Определить энергию электрического поля промышленной частоты (50 Гц), поглощенную телом человека, работавшего в ОРУ в течение  $t = 4$  ч, стоя непосредственно на земле в токопроводящей обуви без каких-либо средств защиты от воздействия электрического поля. При этом напряженность электрического поля на уровне высоты его роста составляла 5 кВ/м.

Дано. Рост человека  $a = 1,8$  м, масса его тела  $G = 97$  кг, плотность тела  $\rho_{\text{ч}} = 1,05$  г/см<sup>3</sup>; удельное электрическое сопротивление тела человека  $\rho = 10$  Ом·м.

Указание. Следует заменить тело человека равной ему по высоте и объему половиной эллипсоида вращения с полуосями  $a$  и  $b$ , стоящего так, что большая его полуось  $a$  перпендикулярна поверхности земли.

**Задача 4.** По условиям воздействия электрического поля промышленной частоты (50 Гц) на организм человека необходимо оценить допустимость пребывания человека на балконе второго этажа жилого дома. Дом находится на границе санитарно-защитной зоны ЛЭП 500 кВ на расстоянии  $A = 30$  м от проекции на землю крайней и точно против середины пролета линии. Расположение проводов на опоре горизонтальное; грозозащитные тросы изолированы от опор.

Дано. Количество проводов в фазе  $n = 3$ ; шаг расщепления  $a = 0,4$  м; марка проводов АСО-500; радиус провода  $r = 1,54$  см; расстояние между соседними проводами на опоре  $d = 10,9$  м; высота крепления проводов к гирлянде  $H_{\text{п}} = 18$  м; габарит линии  $H_0 = 8$  м; длина пролета линии  $L = 335$  м.

Требуется произвести по итогам расчета оценку напряженности электрического поля, создаваемого ЛЭП на высоте роста человека (1,8 м), стоящего на балконе дома (рисунок 1.8).

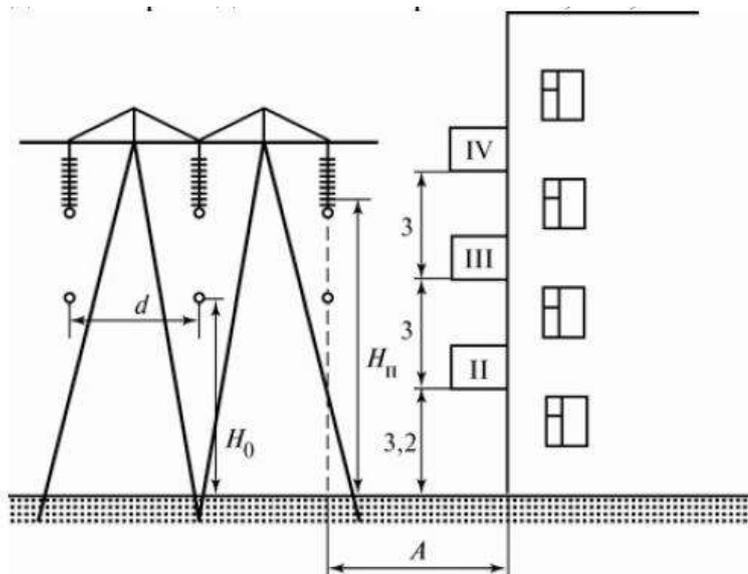


Рисунок 1.8 – К вычислению напряженности электрического поля, создаваемого ЛЭП, на балконе второго этажа жилого дома

Примечание. В действительных условиях напряженность электрического поля на балконе дома, как правило, сильно отличается от расчетных значений

вследствие экранирующего действия здания. Поэтому в подобных случаях напряженность электрического поля следует определять непосредственным измерением.

**Задача 5.** Вычислить напряженность электрического поля, генерируемого ЛЭП 330 кВ, на высоте тела человека, стоящего под средним проводом (фазой) в середине пролета ЛЭП. Линия имеет горизонтальное расположение проводов; грозозащитные тросы изолированы от опор; фазы расщепленные.

Дано: количество проводов в фазе  $n = 2$ ; шаг расщепления фазы  $a = 0,4$  м; радиус каждого провода  $r_0 = 13,6$  мм; расстояние между соседними фазами  $d = 8,9$  м; высота подвеса проводов на опоре  $H_{\text{п}} = 20$  м; габарит линии  $H_0 = 7,5$  м; рост человека  $h = 1,8$  м.

## 1.2 Технические решения по системам ВЧ-связи

Цель работы – изучение типовых решений, применяемых при организации ВЧ связи по высоковольтным проводам и грозозащитным тросам. Материал основан на стандарте СТО 56947007- 33.060.40.134-2012.

### 1.2.1 Основные положения

Далее используются следующие термины и определения.

Высокочастотный канал по линии электропередачи (ВЧ канал) – канал для передачи информации, организованный по проводам (фазным или грозозащитным тросам) линии электропередачи постоянного или переменного токов напряжением 35 кВ и выше.

Высокочастотный тракт (ВЧ-тракт) – составной четырехполюсник, в который входят заключенные между ВЧ-входом и ВЧ-выходом аппаратуры уплотнения и связанные единой схемой устройства обработки и присоединения, линии электропередачи и подстанции. ВЧ тракт может быть простым, имеющим только один линейный тракт, состоящий из одной ВЛ (транспонированной или нетранспонированной), или сложным, когда в его состав входят более чем одна ВЛ (с ВЧ-обходами), и/или ответвления и/или

кабельные вставки.

Линейный тракт высокочастотного канала – составной четырехполосник, в который входит часть ВЧ тракта, заключенная между точками подключения устройств присоединения (конденсатора связи с фильтром присоединения) к проводам (фазам, тросам) на концах одной ВЛ или КЛ.

Высокочастотный заградитель (ВЧЗ) – устройство, содержащее силовой реактор, элемент настройки, защитный элемент.

Конденсатор связи (КС) – конденсатор, совместно с фильтром присоединения обеспечивающий присоединение аппаратуры связи к фазным проводам или тросам линии электропередачи.

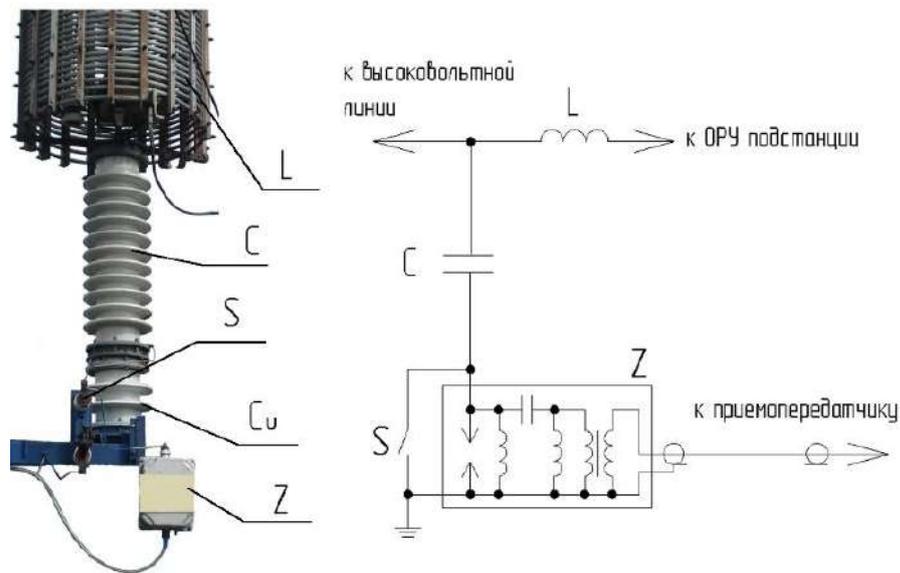
Фильтр присоединения (ФП) – устройство, образующее совместно с конденсатором связи полосовой фильтр или фильтр верхних частот. Фильтр присоединения совместно с конденсатором связи обеспечивает передачу через него с заданными параметрами ВЧ сигналов, и отделение аппаратуры уплотнения от воздействия рабочего напряжения сети и всех видов перенапряжений, возникающих в ней.

Устройства обработки и присоединения – устройства, посредством которых обеспечивается возможность работы ВЧ аппаратуры по линии электропередачи при различных режимах сети.

Устройство присоединения – последовательно включенные между проводами линии и аппаратурой передачи конденсатор связи, фильтр присоединения, разделительные фильтры и высокочастотный кабель, а также устройство их защиты. Типовая схема устройства присоединения ВЧ-связи по схеме «фаза-земля» приведена на рисунке 1.9.

Устройство обработки – ВЧЗ, включаемый в провод линии для уменьшения ответвления энергии сигналов ВЧ канала в нежелательных направлениях и обеспечения работы ВЧ каналов при различных режимах сети.

Разделительный фильтр – устройство, служащее для обеспечения независимой параллельной работы аппаратуры ВЧ каналов по одному высокочастотному тракту.



L – ВЧ-заградитель; C – конденсатор связи;  $C_u$  – подставка конденсатора; Z – фильтр присоединения; S – разъединитель однополюсный (заземляющий нож)

Рисунок 1.9 – Устройство присоединения ВЧ-связи по схеме «фаза-земля»

Специализированные ВЧ каналы – ВЧ каналы, предназначенные только для передачи сигналов высокочастотной релейной защиты или сигналов и команд РЗ и ПА.

ВЧ канал связи – ВЧ-канал, в котором возможна передача сигналов электросвязи разных типов и назначений (телефонии, сигналов телемеханики, данных).

Комбинированные ВЧ каналы – ВЧ каналы, в которых возможна передача сигналов электросвязи (телефонии, сигналов телемеханики, данных) и сигналов-команд релейной защиты и/или противоаварийной автоматики.

Сигнал релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА) – сигнал в аналоговом или цифровом виде, несущий информацию о значениях параметров работы ВЛ (напряжение, ток, фаза) и параметров состояния электротехнического оборудования для системы РЗ, для системы ПА дискретный сигнал, несущий информацию для пуска ПА.

Команда релейной защиты и противоаварийной автоматики – дискретная информация, предписывающая выполнение определенных операций в рамках работы систем РЗ и ПА. Команда может передаваться с помощью одного или

комбинации из нескольких сигналов.

Специализированная ВЧ аппаратура – аппаратура передачи сигналов высокочастотной релейной защиты или сигналов-команд РЗ и ПА. Аппаратура ВЧ связи – система уплотнения ВЧ канала, без функций передачи сигналов-команд РЗ и ПА, позволяющая организовать телефонные каналы, а также каналы передачи телеинформации и данных с использованием как встроенных, так и внешних модемов.

Комбинированная ВЧ аппаратура – аппаратура системы уплотнения комплексного использования для комбинированного ВЧ канала, позволяющая передавать сигналы разных типов и назначений (телефонии, сигналов телемеханики, данных, сигналов-команд РЗ и ПА).

Рабочие полосы частот ВЧ канала – полосы частот по передаче и приему для специализированной, комбинированной ВЧ аппаратуры и аппаратуры ВЧ связи, назначенные в установленном порядке в диапазоне 16–1000 кГц для конкретного ВЧ канала на линии электропередачи.

Организация ВЧ тракта на ВЛ и присоединение ВЧ аппаратуры к линии осуществляется различными способами. Основными способами присоединения являются несимметричные и симметричные схемы. При несимметричной схеме присоединения ВЧ аппаратура включается между проводом (или несколькими проводами) и землей по схемам «фаза–земля», «две фазы–земля», «трос–земля». При симметричных схемах ВЧ аппаратура подключается между двумя проводами линий («фаза–фаза», «трос–трос», два провода одной фазы). Чаще применяются схемы «фаза–фаза», «фаза–фаза разных линий». ВЧ тракты «трос–земля» и «трос–трос» на основании технико-экономического обоснования и для облегчения электромагнитной обстановки могут использоваться на линиях электропередачи, имеющих проводящие грозозащитные тросы, при условии, что на данных линиях не предусматривается прокладка волоконно-оптических кабелей, встроенных в грозозащитный трос. На ВЛ 330 кВ в случаях с затруднением выбора частот и для облегчения электромагнитной обстановки могут использоваться ВЧ тракты

«провод–провод» одной фазы (внутрифазный тракт). Выбор оптимальных схем присоединения должен выполняться с учетом рекомендаций стандартов [СТО 56947007-33.060.40.052-2010 Методические указания по расчету параметров и выбору схем высокочастотных трактов по линиям электропередачи 35-750 кВ переменного тока, ОАО «ФСК ЕЭС», СТО 56947007-33.060.40.045-2010 Руководящие указания по выбору частот ВЧ каналов по линиям электропередачи 35, 110, 220, 330, 500 и 750 кВ, ОАО «ФСК ЕЭС», СТО 56947007-33.060.40.108-2011 Нормы проектирования систем ВЧ связи, ОАО «ФСК ЕЭС»]

Для организации ВЧ каналов по линиям высокого напряжения используется диапазон частот 16–1000 кГц. Нижняя граница по частоте ограничена параметрами устройств обработки и присоединения, так как на низких частотах для получения удовлетворительных параметров ВЧ-тракта необходимы большие значения индуктивностей реакторов заградителей и емкостей конденсаторов связи. Верхняя граница частотного диапазона обусловлена допустимым значением линейного затухания, возрастающего с увеличением частоты, а также требованиями по ЭМС со средствами связи других ведомств.

### **1.2.2 Функциональные требования к аппаратуре**

При организации ВЧ-каналов по ВЛ приоритет отдается использованию многофункциональной комбинированной ВЧ-аппаратуры для передачи следующих видов информации, необходимой для управления работой энергосистемы как в нормальных режимах, так и при аварийных ситуациях, а именно:

- речь, для обеспечения оперативно-диспетчерского и технологического управления;
- сигналы телемеханики (ТМ) и автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учёта электроэнергии (АИИС КУЭ);

- передача данных автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП), системы автоматического регулирования частоты и активной мощности (АРЧМ);
- сигналы РЗ и ПА (не менее 24 команд).

Передача сигналов дифференциально-фазных защит (ДФЗ) должна осуществляться по ВЧ-каналам на специализированной ВЧ-аппаратуре. При необходимости создания ВЧ-каналов, предназначенных для передачи только речи, ТМ и данных рекомендуется использовать аппаратуру ВЧ-связи, в которой отсутствуют функции передачи сигналов команд.

Аппаратура системы ВЧ-связи должна обеспечивать:

- возможность создания сложных сетевых топологий (Т-образные схемы, точка– многоточка);
- для аппаратуры ВЧ-связи – возможность интеграции в единую сеть управления и диагностики системы связи, для специализированной ВЧ-аппаратур;
- возможность интеграции в систему АСУТП;
- для комбинированной ВЧ-аппаратуры – интеграцию в обе системы: АСУТП и сеть управления связи;
- возможность местного управления конфигурацией и режимами;
- текущий непрерывный контроль параметров передачи/приема канала;
- удаленную диагностику аппаратуры, как по служебным, так и по сторонним каналам связи;
- мониторинг параметров аппаратуры, в том числе трактов передачи и приема с хронологической фиксацией произошедших событий в энергонезависимой памяти.

### **1.2.3 Высокочастотные заградители**

Для отделения ВЧ-тракта передачи сигнала от оборудования высокого напряжения подстанции, которое имеет низкое сопротивление для высоких частот канала связи, в фазный провод линии высокого напряжения должен

включаться высокочастотный заградитель, который должен ослаблять влияние входного сопротивления подстанции или ответвления и служить для отделения шунтирующих ВЧ-тракт элементов (подстанций и ответвлений), которые при отсутствии заградителей приводят к увеличению затухания тракта. Пример конструкции приведен на рисунке 1.10.

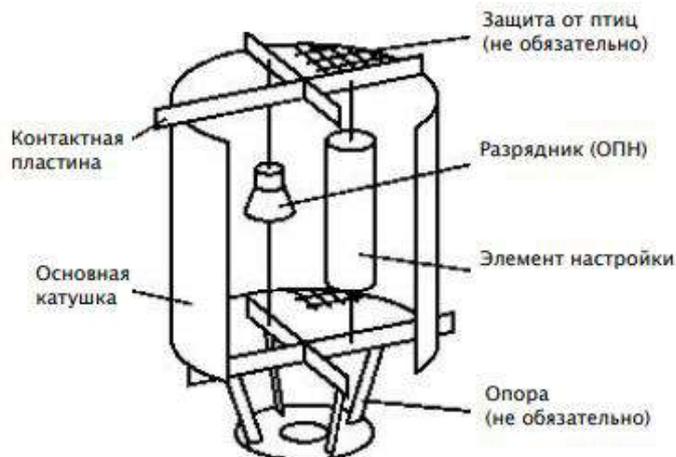


Рисунок 1.10 – Устройство ВЧЗ

ВЧЗ состоит из основной силовой катушки (реактора), по которой проходит рабочий ток линии, элемента настройки и защитного устройства (разрядник или ОПН), присоединяемого параллельно катушке и элементу настройки. Силовая катушка заградителя с элементом настройки образуют двухполюсник, имеющий высокое сопротивление на рабочих частотах ВЧ-канала, и очень малое сопротивление для тока промышленной частоты 50 Гц. ВЧЗ должен давать возможность настройки на полосы заграждения в пределах рабочего диапазона 16–1000 Гц.

Высокочастотные свойства заградителя характеризуются полосой заграждения, полосой частот, в которой сопротивление заградителя должно быть не меньше допустимого значения. В полосе заграждения активная составляющая полного сопротивления ВЧЗ должна быть не менее чем в 1,41 раза больше характеристического сопротивления линии, для которой этот ВЧЗ предназначен.

Применяются заградители, рассчитанные на запирающие одну или двух

узких полос (одно- и двухполосные заградители) либо одной широкой полосы частот в десятки и сотни килогерц (широкополосные заградители). Ширина полос заграждения пропорциональна индуктивности реактора и обратно пропорциональна заданному сопротивлению заградителя на краях полосы. Широкополосные заградители должны использоваться в случаях необходимости запираеть частоты нескольких ВЧ каналов, подключенных к одному и тому же проводу линии.

Используются заградители с индуктивностью от 0,1 до 2,0 мГн, так как реализовать реактор с большей индуктивностью затруднительно и нецелесообразно из-за значительного увеличения размеров, массы и стоимости заградителя. Необходимо учитывать, что рабочий ток заградителя тем выше, чем выше напряжение линии. На ВЛ 35–750 кВ используются заградители на рабочие токи от 100 до 4000 А.

Различные схемы настройки и необходимый диапазон запираемых частот получают, используя элемент настройки заградителя. Заградители отличаются по схемам настройки, значениям индуктивностей, допустимым токам силовых катушек (номинальный длительный ток и номинальный кратковременный ток). При выборе предпочтительной схемы широкополосной настройки следует учитывать, что если силовая катушка имеет большую индуктивность, то применение заградителя по схеме фильтра верхних частот обладает преимуществом за счет более простой схемы и отсутствия ограничения верхнего предела полосы заграждения. Выбирая тип ВЧЗ необходимо обращать внимание на то, что собственная резонансная частота реактора ВЧЗ всегда должна быть выше верхней рабочей частоты ВЧ-канала.

Электродинамическая и термическая стойкость заградителя определяется максимальным током к.з., который он выдерживает. Электродинамическая стойкость характеризуется ударным током к.з., который равен  $\sim 2,55I_{к.з.}$ . Термическая стойкость характеризуется номинальным кратковременным током – значением установившегося тока к.з., протекающего в течение определенного времени через реактор без его повреждения. Одно секундной

термической стойкостью заградителя называют ток к.з., который в течение 1 с нагревает провода реактора на температуру, соответствующую указанному производителем классу изоляции. При увеличении времени протекания тока, термическая стойкость уменьшается в  $\sqrt{t}$  раз.

Напряжение волны перенапряжения, возникающей на воздушной линии, распределяется между реактором, конденсаторами элемента настройки и входным сопротивлением шин подстанции. Для защиты конденсаторов настройки и силовой катушки параллельно силовой катушке должен подсоединяться элемент защиты (разрядник или ОПН), ограничивающий напряжение на элементах заградителя до безопасного для них значения.

При выборе заградителя должны учитываться номинальный рабочий ток, ток к.з., напряжение ВЛ, габариты ВЛ и требуемая полоса заграждения. Также необходимо обращать внимание на то, что активная составляющая полного сопротивления в полосе заграждения должна быть больше характеристического сопротивления линии не менее чем в 1,41 раза, при этом обеспечивается максимальная величина вносимого затухания не более 2,6 дБ. Величины характеристических сопротивлений линий разного класса напряжения для разных схем присоединения приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристическое сопротивление линии  
в зависимости от схемы включения

Номинальное напряжение ВЛ, кВ	Характеристическое сопротивление линии для схемы, Ом					
	Фаза- земля	Фаза-фаза*	Две фазы- земля*	Трос-земля	Трос-трос*	Два троса- земля*
35	450	400	540	–		
110						
220						
330	330	300	400			
500	310	275	370	550	480	550
750	280	250	340	550	480	550

\* – указана величина характеристического сопротивления для каждой фазы (каждого троса)

Имеется несколько типов установки ВЧЗ. Подвесные применяются, когда имеется одна или несколько точек подвески. ВЧЗ могут устанавливаться непосредственно на конденсаторы связи, емкостные трансформаторы напряжения или опорный изолятор.

Основные технические характеристики ВЧЗ типа ВЗ-1250 приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Технические характеристики ВЧЗ типа ВЗ-1250

Характеристики \ Тип заградителя	ВЗ-1250-0,5	ВЗ-1250-1,0	ВЗ-2000-0,5	ВЗ-2000-1,0	ВЗ-4000-0,5
Номинальный длительный ток, А	1250	1250	2000	2000	4000
Номинальная индуктивность реактора L, мГн	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
Индуктивность реактора на частоте 50 Гц, мГн	0,5	1,1	0,540	1,031	0,524
Индуктивность реактора на частоте 100 кГц, мГн	0,49	1,04	0,52	1,0	0,508
Собственная емкость, пФ	100	80	86	50	100
Номинальный кратковременный ток КЗ, кА, (МЭК серия 1 / серия 2)	31,5 / 40	31,5 / 40	40 / 50	40 / 50	63 / 80
Ударный ток КЗ, кА, МЭК серия 1 /серия 2	80 / 102	80 / 102	102/128	102/128	161/204
Номинальное напряжение, кВ	110-330	110-330	330-750	330-750	500-750
Тип защиты	ОПН	ОПН	ОПН	ОПН	ОПН
Тип элемента настройки	ЭН-0,5	ЭН-1,0	ЭН-0,5	ЭН-1,0	ЭН-0,5
Максимально допустимые потери, кВт	8,5	17	16	23	40
Масса, кг	260	334	415	580	1200
Высота, мм	1465	1710	1608	1700	1638
Диаметр, мм	1205	1540	1205	1540	1310

#### 1.2.4 Конденсаторы связи

Еще одним из основных элементов схемы присоединения аппаратуры связи к линиям электропередачи является КС высокого напряжения. Конденсатор должен обеспечивать передачу сигналов ВЧ связи в диапазоне 16 1000 кГц при максимальной пиковой мощности огибающей ВЧ-сигнала не менее 400 Вт. Конденсатор связи, включаемый на полное напряжение сети, должен обладать достаточной электрической прочностью. Максимальное рабочее напряжение конденсатора должно быть при номинальном напряжении элемента:

- $66/\sqrt{3}$  – максимальное напряжение  $\geq 44$  кВ;
- $110/\sqrt{3}$  – максимальное напряжение  $\geq 78$  кВ;
- $166/\sqrt{3}$  – максимальное напряжение  $\geq 110$  кВ.

Для лучшего согласования входного сопротивления линии и устройства

присоединения емкость КС должна быть достаточно большой. Если фазное напряжение ВЛ больше номинального напряжения единичного конденсатора, то должна составляться батарея из последовательно соединенных конденсаторов, устанавливаемых один на другой. Номинальные емкости конденсаторов, используемых на линиях различного класса напряжения должны соответствовать величинам, указанным в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Номинальная емкость КС

Номинальное напряжение элемента КС, кВ	Номинальная емкость конденсатора, нФ / отклонение емкости от номинального значения, %	Число последовательно включенных конденсаторов в КС для ВЛ с номинальным напряжением, кВ				
		35	110	220	330	500
$66/\sqrt{3}$	4,4/(+10; -5) %	1	–	–	–	–
$110/\sqrt{3}$	6,4/(+10; -5) %	–	1	2		
$166/\sqrt{3}$	14/(±5) %	–	–	–	2	3

Конденсаторы, имеющие в обозначении типа букву «П», содержат в своей конструкции изолирующую подставку для установки на фундаменте, а имеющие букву «В» – вывод для присоединения аппаратного зажима ошиновки. Конденсаторы в фарфоровой армированной крышке в составе обозначения типа конденсатора имеют букву «А».

Пример используемых обозначений, КСА-220/3-3,2 УХЛ1:

**КС** - конденсатор связи;

**А** – армированная крышка;

**Б** – категория электрооборудования в зависимости от длины пути утечки внешней изоляции;

**220** – номинальное напряжение, кВ;

**3-3,2** – емкость, нФ;

**УХЛ1** – Климатическое исполнение и категория размещения.

Паразитная емкость между выводом низкого напряжения конденсатора и выводом «Земля», и изолирующих подставок не должна превышать 100 пФ. Проводимость утечки между выводом низкого напряжения конденсатора и выводом «Земля» не должна превышать  $0,2 \cdot 10^{-10}$  См. Это же требование относится к изолирующей подставке КС. Значение тангенса угла потерь

конденсатора, измеренное при температурах плюс 20 и плюс 60°C и номинальном напряжении частоты 50 Гц, должно быть не более  $3 \cdot 10^{-3}$ .

### 1.2.5 Фильтр присоединения

Для токов высокой частоты ФП совместно с КС согласует сопротивление ВЧ-кабеля с входным сопротивлением линии электропередачи и образует фильтр для передачи токов высокой частоты в линию с малыми потерями. Ток высокой частоты, проходя через КС по первичной обмотке ФП на землю, наводит во вторичной обмотке напряжение, которое через конденсатор и соединительную линию попадает на вход аппаратуры связи. ФП с КС образует полосовой фильтр или фильтр верхних частот. ФП должен обеспечивать передачу ВЧ сигналов с заданными параметрами и отделение аппаратуры уплотнения от воздействия рабочего напряжения сети и всех видов перенапряжений, возникающих в ней.

При обрыве или плохом контакте в цепи ФП, КС может оказаться под полным напряжением линии. В целях безопасности все работы на фильтре должны производиться при заземлении нижней обкладки КС специальным заземляющим ножом. Заземляющий нож должен обеспечивать надежное заземление нижней обкладки конденсатора связи. Сопротивление заземляющего ножа во включенном состоянии на промышленной частоте не должно превышать 0,1 Ом. Заземляющий нож должен выдерживать длительное протекание тока промышленной частоты 300 А и кратковременный (в течение не менее 1 с) ток промышленной частоты 16 кА.

Согласованием входного сопротивления ВЧ-аппаратуры связи и линии достигаются минимальные потери энергии ВЧ-сигнала. Согласование с воздушной линией (ВЛ), имеющей сопротивление 280–450 Ом, не всегда удается выполнить полностью, так как при ограниченной емкости КС фильтр с характеристическим сопротивлением со стороны линии, равным характеристическому сопротивлению ВЛ, может иметь узкую полосу пропускания. Основным требованием при получении нужной полосы

пропускания является величина затухания несогласованности ФП в полосе пропускания, определенная при нагрузке на соответствующие номинальные сопротивления линии и ВЧ кабеля, которая должна быть не менее 12 дБ, как со стороны линейного, так и со стороны кабельного входов.

Фильтр присоединения должен подключаться к КС проводом сечением не менее 10 мм<sup>2</sup>. Фильтр присоединения соединяется с ВЧ-аппаратурой высокочастотным кабелем. К одному кабелю может быть подключено несколько полукомплектов ВЧ-аппаратуры. В этом случае для ослабления взаимных влияний между аппаратурой должны применяться разделительные фильтры. При параллельном подключении аппаратуры связи и аппаратуры РЗ и ПА включение разделительных фильтров обязательно. Основные характеристики фильтров типа ФПМ приведены в таблице 1.5.

### 1.2.6 Разделительные фильтры

Каналы РЗ и ПА, требуют обязательного применения разделительных фильтров (РФ) для защиты от замыкания в цепях параллельно включенной аппаратуры других ВЧ-каналов, работающих через общее устройство присоединения. При параллельном подключении ВЧ-аппаратуры связи и ВЧ-аппаратуры, предназначенной для передачи сигналов команд РЗ или ПА, РФ на соответствующих частотах каждого из каналов РЗ и ПА должны включаться в шунтирующие цепи других каналов.

РФ должен обеспечивать возможность круглосуточной работы в закрытом помещении в климатических условиях интервале температур от 0 °С до +45 °С при относительной влажности не более 95 % при 25 °С.

Разделительный фильтр должен иметь возможность:

- работы в схеме канала «фаза–земля»;
- работы в схеме канала «фаза–фаза»;
- присоединения к оборудованию ВЧ связи, РЗ и ПА с номинальным входным сопротивлением 75 Ом.

Мощность тока высокой частоты в полосе пропускания должна быть не

менее 250 ВА. Вносимое затухание на частотах поста ВЧ-защиты при замыкании входных цепей аппаратуры связи должно быть не более 0,9 дБ. Вносимое затухание в канал связи на частотах, отстоящих в пределах  $\pm 10\%$  от рабочей частоты поста защиты – не более 0,9 дБ.

### 1.2.7 Коаксиальные радиочастотные кабели

Как правило, присоединение ВЧ-аппаратуры к ФП осуществляется коаксиальным радиочастотным кабелем с волновым сопротивлением 75 Ом. Диаметр внутреннего проводника кабеля должен быть не более 2,5 мм. Внешний диаметр кабеля должен быть не более 15 мм.

Испытательное напряжение изоляции частотой 50 Гц должно быть не менее 2,5 кВ в течение 60 с. Кабель должен прокладываться в лотках или трубах. Как правило, используется кабель РК 75-9-12, допускается использование кабеля РК 75-7-319ф-С, имеющего меньшее километрическое затухание. Кабель не должен поддерживать горения. Класс пожарной опасности кабелей по ГОСТ Р 53315.

Таблица 1.5 – Характеристики фильтров типа ФПМ

Номер модификации	Емкость присоединения, пФ	Линейное напряжение, кВ	Номинальное сопротивление со стороны ВЛ,	Входное сопротивление фильтра, Ом	Полоса пропускания кГц
1.	2200	110	450	587	74–193
2.	2200	110	450	560	116–1000
3.	6400	110	450	581	36–256
4.	6400	110	450	560	51–1000
5.	6400	110	450	560	36–63
6.	3200	220	450	581	50–124
7.	3200	220	450	581	76–1000
8.	7000	330	330	439	36–124
9.	7000	330	330	439	47–1000
10.	7000	330	330	439	36–64
11.	4650	500	310	405	50–127
12.	4650	500	310	405	75–1000
13.	4650	500	310	405	36–48
14.	4650	500	310	405	45–65
15.	4650	500	310	405	50–76
16.	3000	750	280	362	60–103
17.	3000	750	280	362	80–180
18.	3000	750	280	362	125–1000

### 1.2.8 Электропитание аппаратуры ВЧ-связи

Аппаратура ВЧ-связи относится к электроприемникам особой группы 1 категории. Выбор схемы организации электропитания ВЧ-аппаратуры производится в зависимости от её назначения.

Для комбинированной аппаратуры ВЧ-связи должна быть возможность получения электропитания, как от сети переменного тока, так и от сети постоянного тока. При электропитании от сети переменного тока аппаратура должна удовлетворять следующим характеристикам переменного тока:

- номинальное напряжение 230 В;
- допустимое отклонение напряжения от +10 % до –15 %;
- номинальная частота 50 Гц;
- допустимое отклонение частоты  $\pm 5$  %;
- форма синусоидальная с коэффициентом искажения не более 10 %.

При электропитании от источников постоянного тока аппаратура должна удовлетворять следующим характеристикам источников постоянного тока:

- номинальное напряжение 220 В, 110 В, 60 В и 48 В;
- - допустимое отклонение напряжения от +10 % до -20 %;
- пульсации не более 5 %;
- помехи, генерируемые источником питания не более 3 мВ.

Комбинированная и специализированная ВЧ-аппаратура должна выдерживать без повреждений и возникновения ложных команд пропадание и восстановление любого из вторичных напряжений электропитания. Перерывы питания длительностью до 500 мс не должны вызывать ложных команд или перезагрузки процессора комбинированной или специализированной ВЧ-аппаратуры. Комбинированная и специализированная ВЧ-аппаратура должна нормально функционировать при изменениях напряжения электропитания, соответствующих требованиям стандарта МЭК 60834-1.

Аппаратура ВЧ-связи, устанавливаемая в существующем или проектируемом помещении аппаратной связи, должна получать электропитание

48 В постоянным током или переменным током от источника бесперебойного питания (ИБП). При пропадании напряжения во внешней сети переменного тока ИБП должен обеспечивать электропитание аппаратуры, в зависимости от установки аппаратуры на обслуживаемой или необслуживаемой ПС, в течение 3–6 часов. Мощность ИБП выбирается с учетом состава размещенного оборудования и резерва на развитие. Исполнение ИБП – промышленное. Рекомендуется использование централизованного единого ИБП для всей аппаратуры ВЧ-связи, устанавливаемой в аппаратной связи.

### **1.2.9 Резервирование систем ВЧ-связи**

Все каналы передачи оперативной информации должны резервироваться (дублироваться). ВЧ-каналы, если при этом выполняются требования по надежности и готовности каналов передачи оперативной информации и сигналов-команд РЗ и ПА, могут резервироваться с применением других видов связи (ВОЛС, КЛС). При невозможности использования для резервирования каналов альтернативных видов связи, основной и резервный ВЧ-каналы должны быть, наиболее независимыми друг от друга.

Для каждого вида защиты линии электропередачи должен быть свой отдельный канал. В случае если микропроцессорная защита линии электропередачи работает в дублированном режиме (одновременная передача информации по двум каналам), следует организовывать два канала. Переключение резервируемых блоков внутри аппаратуры должно быть автоматическое и обеспечиваться программным обеспечением аппаратуры.

### **1.2.10 Типовые схемы организации ВЧ-каналов**

Все схемы присоединения к проводам (фазам или грозозащитным тросам) линий электропередачи можно разделить на две группы:

- Присоединение между проводами и землей (несимметричная схема). Это, как правило, схемы «фаза–земля», «трос–земля».

- Присоединение между проводами (симметричная схема), как правило, схемы «фаза–фаза», «трос–трос», внутрифазное или внутритросовое присоединение соответственно к изолированным проводам расщепленной фазы или троса.

Пример варианта организации систем ВЧ связи приведён на рисунке 1.11.

Вариант схемы организации систем ВЧ связи в каждом проекте индивидуален и выполняется согласно заданию на проект строительства, реконструкции энергообъекта, а также согласно требованиям передачи информации разделов проекта в части АСДУ, АСТУ, АСУТП, РЗ, ПА, АИИС КУЭ и т.д. Вариант схемы всегда зависит от:

- расположения объектов, охватываемых проектируемыми системами ВЧ связи, в отношении друг друга на электрических сетях региона проектирования;
- конфигурации этих электрических сетей;
- используемых ВЛ различных классов напряжения;
- наличия действующих ВЧ каналов;
- необходимости либо возможности использования той или иной схемы подключения;
- конструктивных особенностей линий электропередачи (одно-, двухцепная, подвеска проводов горизонтальная, треугольная или на двухцепных опорах, с транспозицией или без, с отпайками и т.д.);
- необходимости создания ВЧ обходов;
- необходимости отбора информации на подстанции ВЧ обхода;
- необходимости создания ВЧ канала до подстанции на отпайке и т.д.

При выборе типа схем присоединения к фазам ВЛ необходимо принимать во внимание следующие соображения: Схема «фаза–земля» наиболее экономична и рекомендуется к использованию для всех видов каналов, если нет обоснованного решения по применению схемы «фаза–фаза». Схему «фаза–фаза» можно предлагать в случаях, если требуется:

- организация ВЧ-тракта по линиям напряжения 110 кВ и ниже со сложной схемой, и получение надежного ВЧ канала;
- организация ВЧ-тракта по длинной ВЛ напряжением 220 кВ и выше, и при этом затухание тракта по схеме «фаза–земля» слишком велико;
- организация каналов РЗ и ПА, и при схеме присоединения «фаза–земля» невозможно обеспечить требуемый запас по затуханию.
- организация цифровых ВЧ каналов.

Разные схемы присоединения «фаза–земля» показаны на рисунке 1.12. Схема с внутрифазным присоединением может быть использована на ВЛ напряжением 330 кВ при условии установки на выбранной фазе изолирующих распорок. Эта схема присоединения имеет гладкую частотную зависимость затухания, оно не зависит от коммутационного состояния ВЛ, но при этой схеме приrost затухания больше подвержен влиянию от гололедно-изморозиевых отложений.

Выбор схемы присоединения к ВЛ («фаза-земля» или «фаза-фаза») должен производиться с учетом следующих требований:

- затухание тракта и уровень помех от короны на выходе тракта должны быть такими, чтобы для организуемого по данному тракту ВЧ-канала обеспечить необходимое соотношение сигнала и помехи при нормируемом запасе по затуханию;
- максимальная неравномерность входного сопротивления, затухания и группового времени запаздывания тракта, вызванная многократно отраженными от мест нарушения однородности ВЛ волнами, не должна превышать допустимую для канала связи, организуемого по рассматриваемому тракту;

нестабильность входного сопротивления, затухания и группового времени запаздывания тракта, вызванная переключениями высоковольтного оборудования на подстанциях, входящих в схему тракта, не должна превышать допустимую.

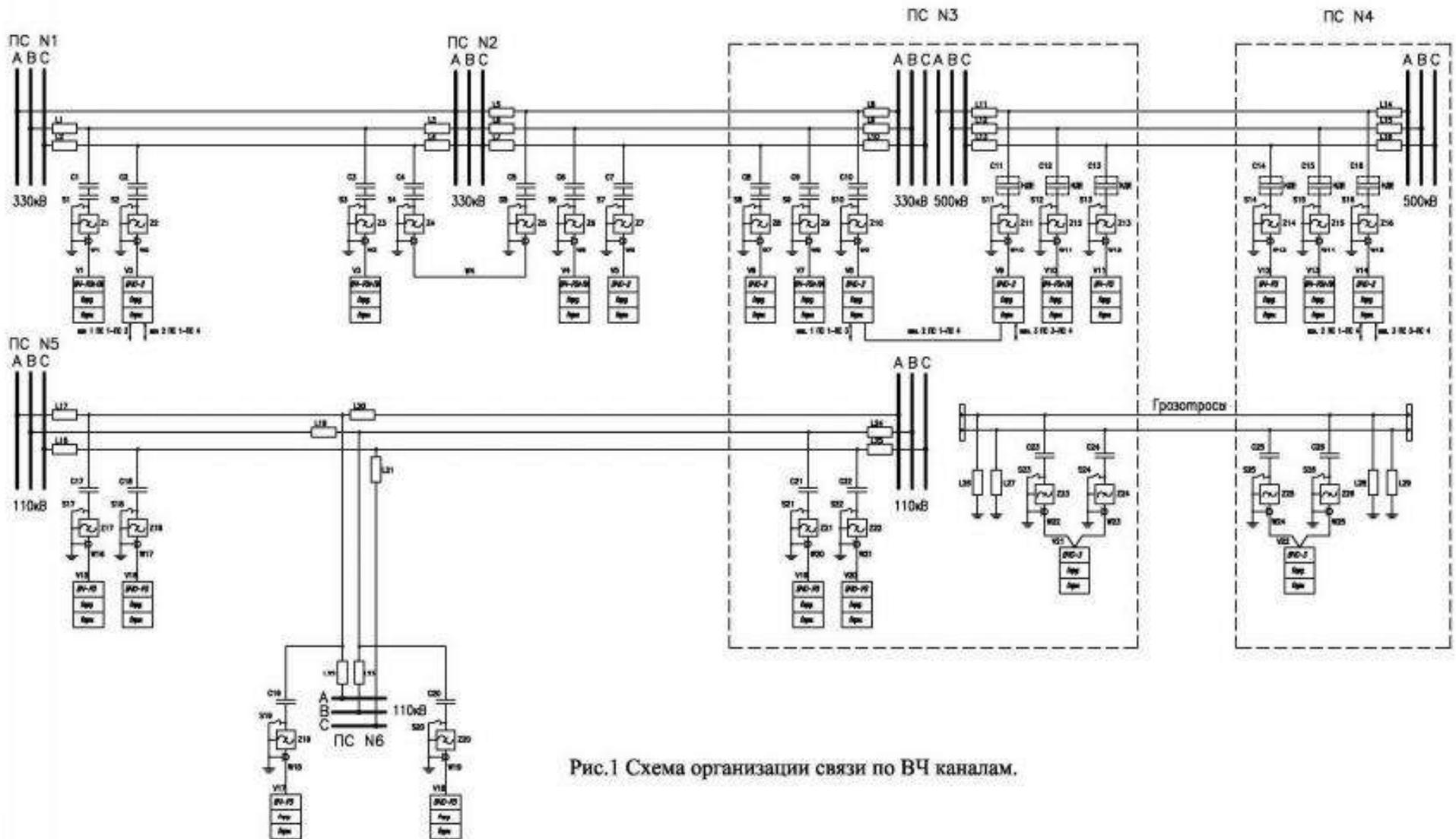


Рис.1 Схема организации связи по ВЧ каналам.

Рисунок 1.11 – Схема организации связи по ВЧ-каналам

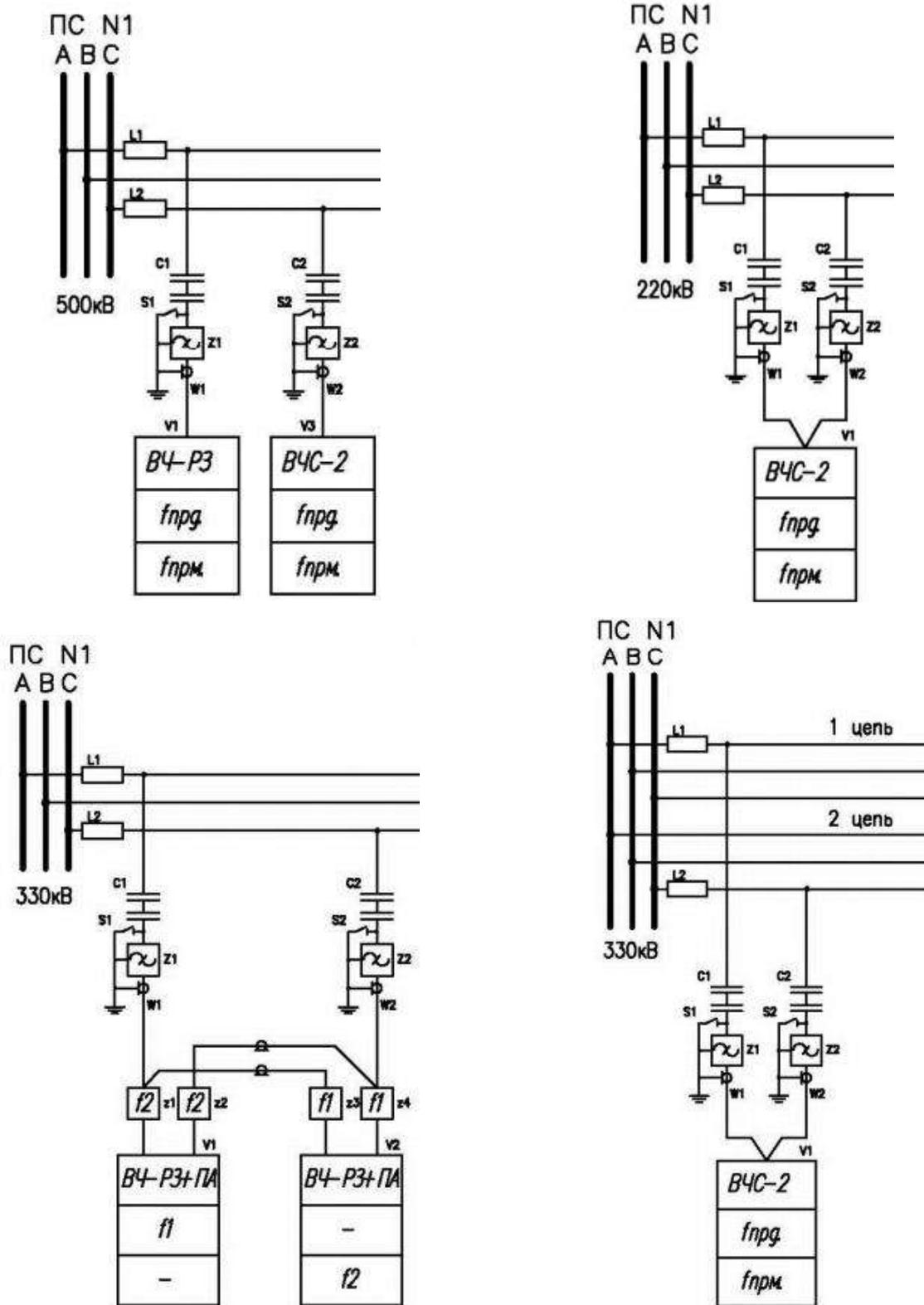


Рисунок 1.12 – Схемы присоединения «фаза-фаза»

Как правило, для трактов с простой схемой рекомендуется применять присоединения к ВЛ по схеме «фаза-земля». Для трактов по ВЛ 220 кВ и ниже со сложной схемой (в схему тракта входят более одного ответвления или

обхода, ответвление и обход, кабельные вставки) предпочтительным является выбор схемы присоединения «фаза–фаза». Для уменьшения затухания и коэффициентов отражения на ответвлении, не используемом для организации связи, обычно устанавливают заградители, включаемые в ответвления в месте его подключения к основной линии. Обработка фазы, не используемой для связи на ответвлении, показана на рисунке 1.13.

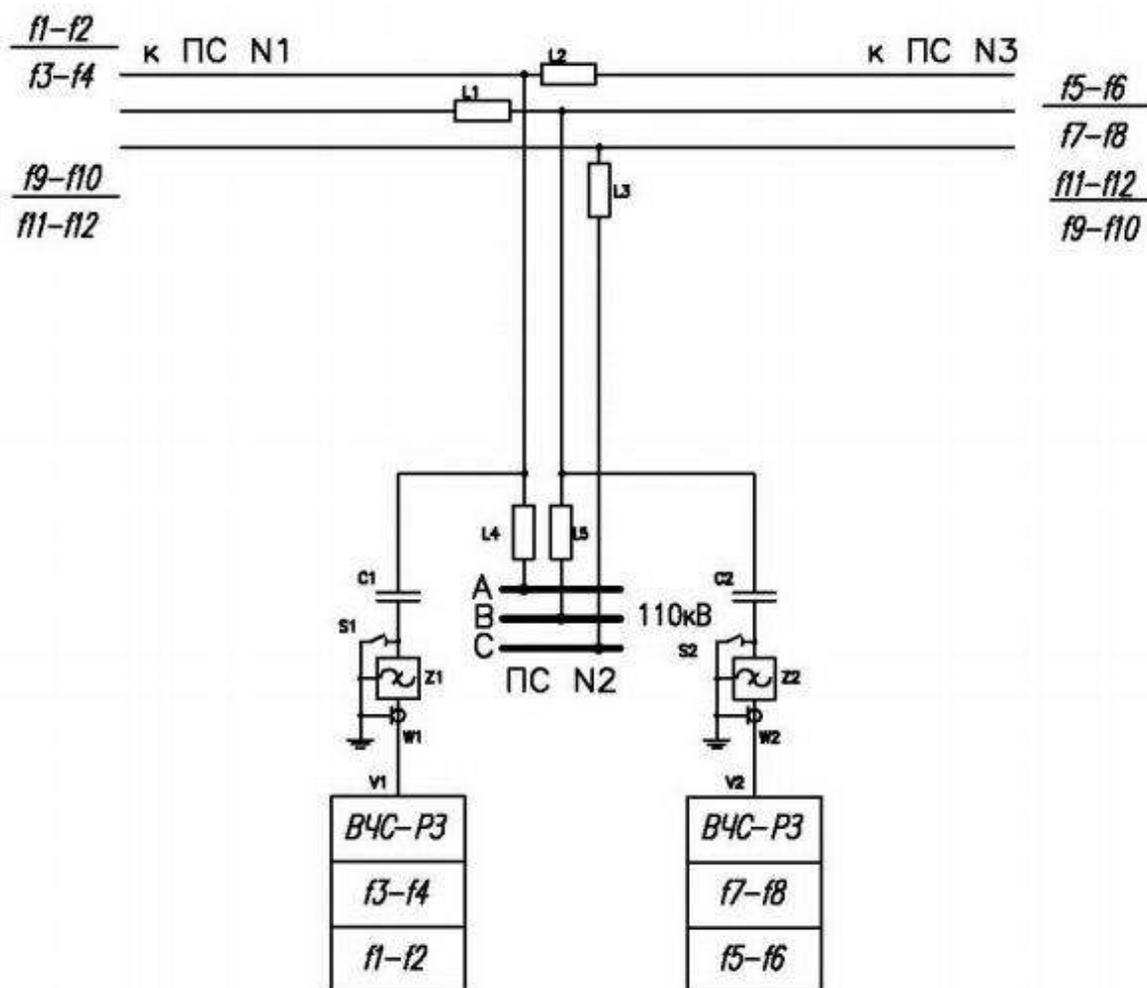


Рисунок 1.13 – Схема организации ответвления

Для ВЧ-каналов с обходами подстанций при параллельном подключении аппаратуры нескольких каналов к одной фазе рекомендуется группировать частоты каналов с различным количеством обходов и разделять полосы частот этих каналов с помощью РФ, включаемых в ВЧ обход. РФ должны пропускать через обход частоты транзитных каналов и запирают частоты каналов, заканчивающихся на подстанции с обходом. При такой схеме обеспечиваются лучшие частотные характеристики ВЧ-тракта и большее значение переходного

затухания подстанции в месте обхода для частот ближних каналов. В ВЧ-каналах, организованных по фазным проводам и грозозащитным тросам ВЛ, допускается совмещение передачи сигналов команд РЗ и ПА, а также их передача с другими видами информации (голос, телемеханика, данные) в одном ВЧ-канале. В ВЧ-каналах, организованных по грозотросам (рисунок 1.14), не допускается передача сигналов ВЧ защит ВЛ (ДФЗ). При коротком замыкании на фазных проводах ВЛ наводится перенапряжение на грозотросах, которое может привести к пробоям искровых промежутков в разрядниках грозотросов с образованием в ВЧ канале интенсивной широкополосной ВЧ помехи. Во время короткого замыкания на ВЛ это может привести к отказу в работе ВЧ каналов релейной защиты, организованных на грозотросе.

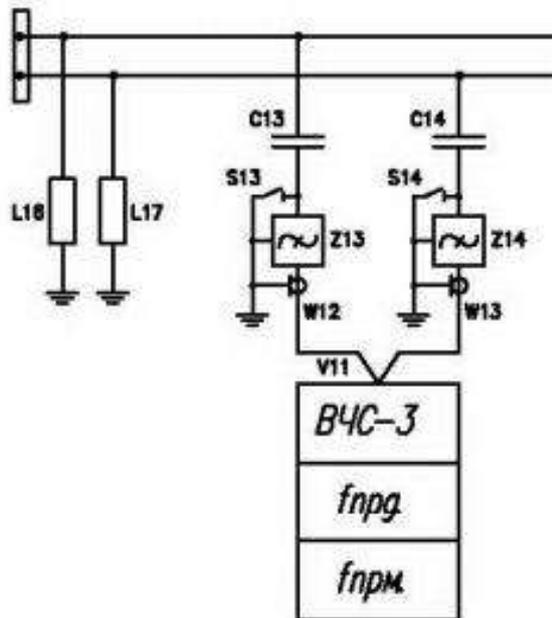


Рисунок 1.14 – Схема присоединения «трос-трос»

К ВЧ защиты (ДФЗ) с каналами РЗ и ПА (на специализированной или комбинированной аппаратуре), как правило, должны организовываться с присоединением к отдельным (разным) фазам ВЛ. Параллельное подключение аппаратуры каналов телефонной связи, передачи данных и сигналов телемеханики и аппаратуры специализированных и комбинированных каналов, по которым передаются сигналы, связанные с защитой и противоаварийной автоматикой, должно осуществляться через разделительные фильтры. РФ

должен включаться в тракт канала телефонной связи и телемеханики и запирает частоты каналов, по которым передаются сигналы защиты и противоаварийной автоматики. Пример подключения показан на рисунке 1.15.

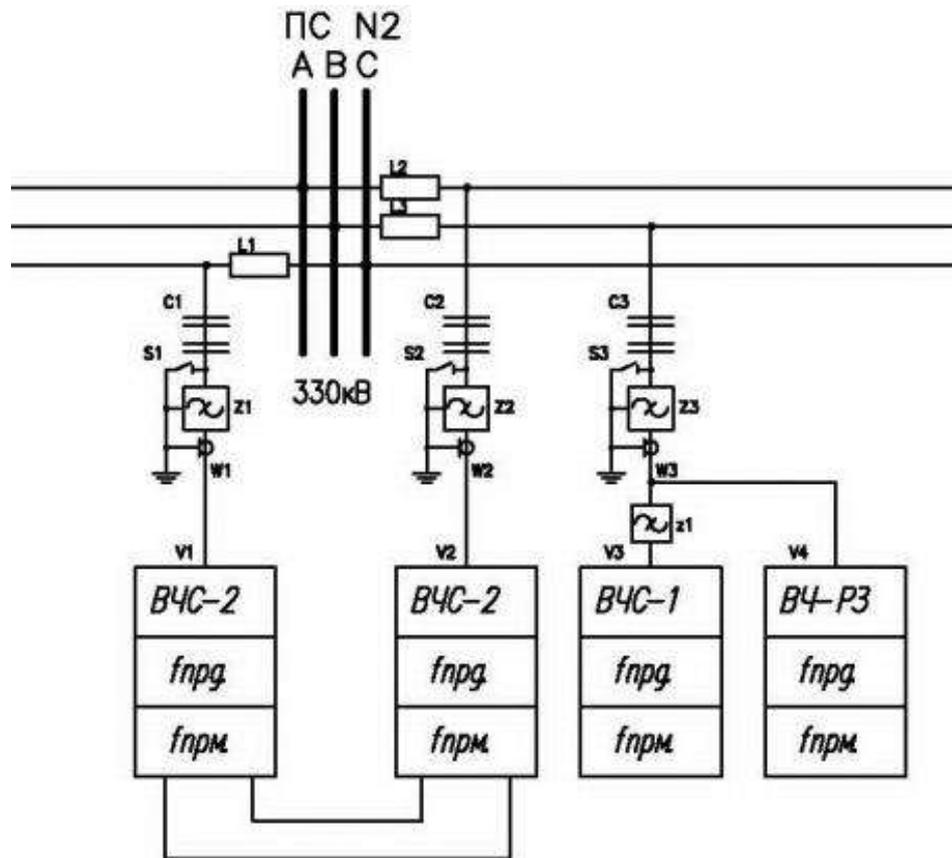


Рисунок 1.15 – «Жесткий» пере прием и параллельная работа

Также возможна организация пере приема с организацией выделения канала, рисунок 1.16.

Параллельное подключение аппаратуры специализированных ВЧ-каналов РЗ и ПА должно осуществляться через РФ, включаемые в тракт каждого канала. При организации ВЧ-каналов по КЛ должно использоваться специальное устройство ВЧ-присоединения. ВЧ каналы по КЛ организуются только в том случае, когда КЛ заходит на открытое распределительное устройство (ОРУ). Как правило, это ВЧ-каналы для РЗ.

РФ должен пропускать частоты транзитного канала и запирает частоты канала, оканчивающегося на обходе. При такой схеме обеспечивается улучшение всех параметров ВЧ тракта каналов, а также снижаются уровни мешающих частот в энергосистеме. Пример схемы в случае с ВЧ каналом,

оканчивающимся на ВЧ обходе, приведён на рисунке 1.17.

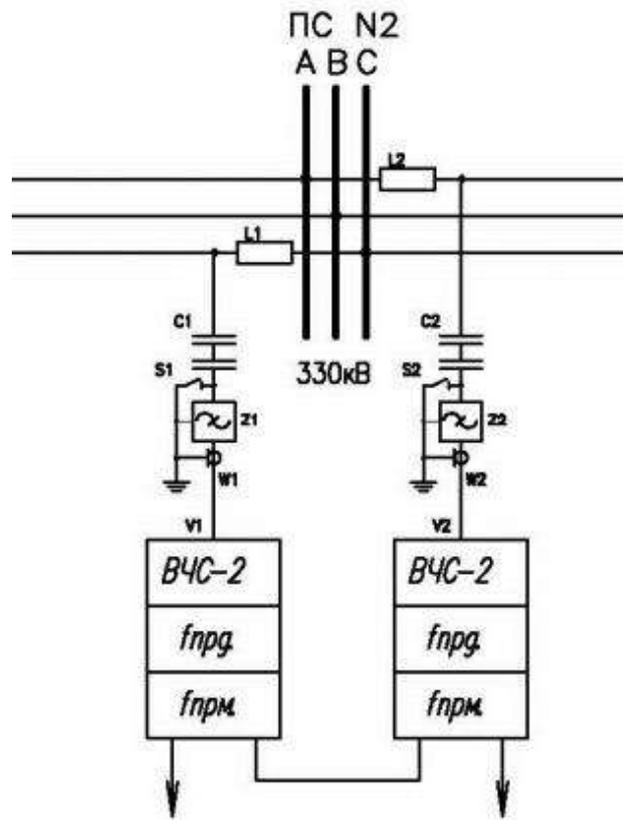


Рисунок 1.16 – Переключение с выделением канала

Если подвеска заградителей в месте подключения ответвления или на расстоянии от этого места невозможна, то используют заградители и фильтры присоединения, включаемые в конце ответвления на ПС. При этом фильтры присоединения должны быть нагружены со стороны зажимов «ВЧ кабель» на резистор с сопротивлением 75 Ом и мощностью 100 Вт. Пример такой схемы приведён на рисунке 1.18.

На транзитных линиях сверхвысокого напряжения (СВН) допускается установка на нерабочей фазе заградителя, с целью увеличения переходного затухания и облегчения ЭМС в диапазоне низких частот, используемых для релейной защиты и противоаварийной автоматики, с соответствующим обоснованием по результатам расчетов.

### 1.3 Расчет параметров линии электропередачи

Цель работы – вычисление погонных параметров и волнового сопротивления линии электропередачи.

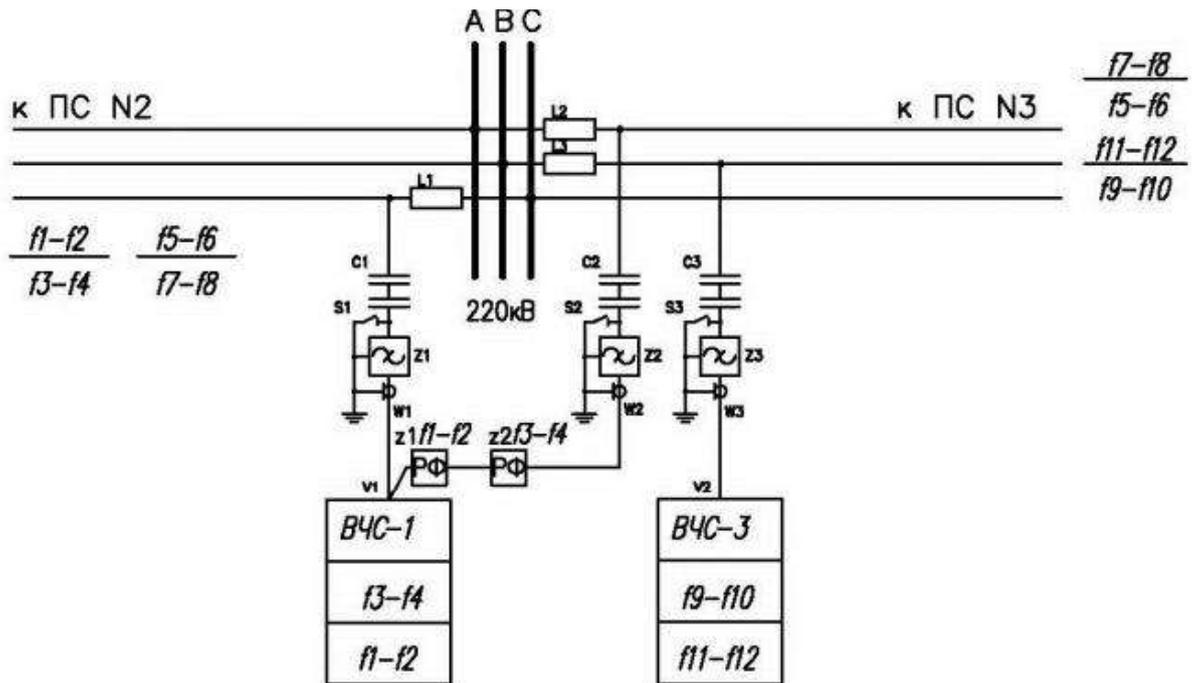


Рисунок 1.17 – ВЧ-обход подстанции с ВЧ-каналом, оканчивающимся на ПС ВЧ-обхода

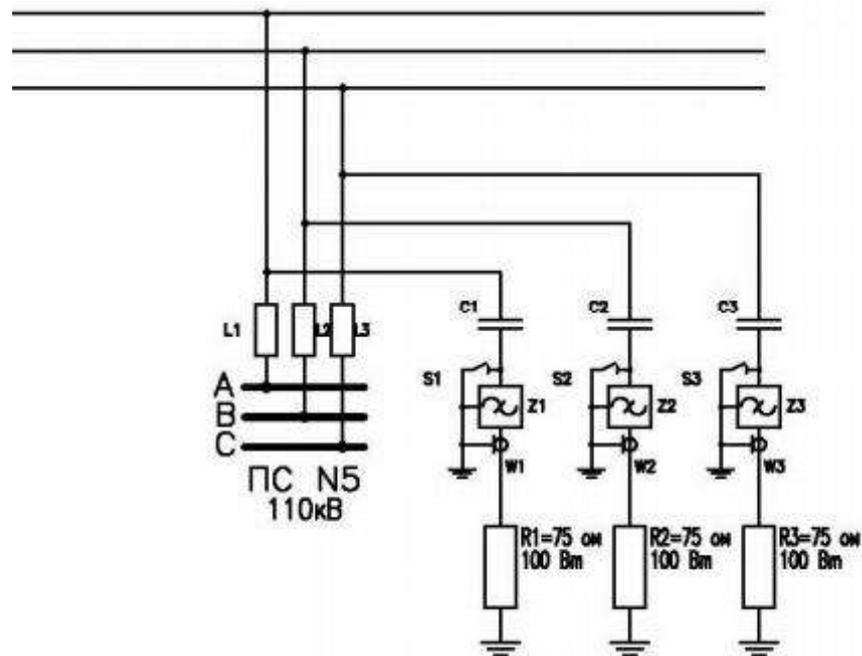


Рисунок 1.18 – Организация ответвления при отсутствии ВЧ-аппаратуры на ПС ответвления и невозможности установки заградителей на отпаечной опоре

При моделировании линий электропередачи необходим учет распределенности их параметров. Эта особенность находит свое отражение при решении проектных и эксплуатационных задач, например, для определения

мест короткого замыкания и др. На практике погонные параметры этих линий, как правило, рассчитываются по аналитическим выражениям.

### 1.3.1 Задание на работу

На рисунке 1.19 приведено поперечное сечение трехфазной линии электропередачи 110 кВ. Необходимо:

1. С помощью системы TALGAT вычислить матрицы коэффициентов электромагнитной ( $L$ ) и электростатической ( $C$ ) индукций, а также волновое сопротивление линии.
2. Проверить сходимость результатов путем учащения сегментации.
3. Полученные результаты сравнить с данными из таблицы 1.2.
4. Сформировать выводы по работе.
5. Оформить отчет.

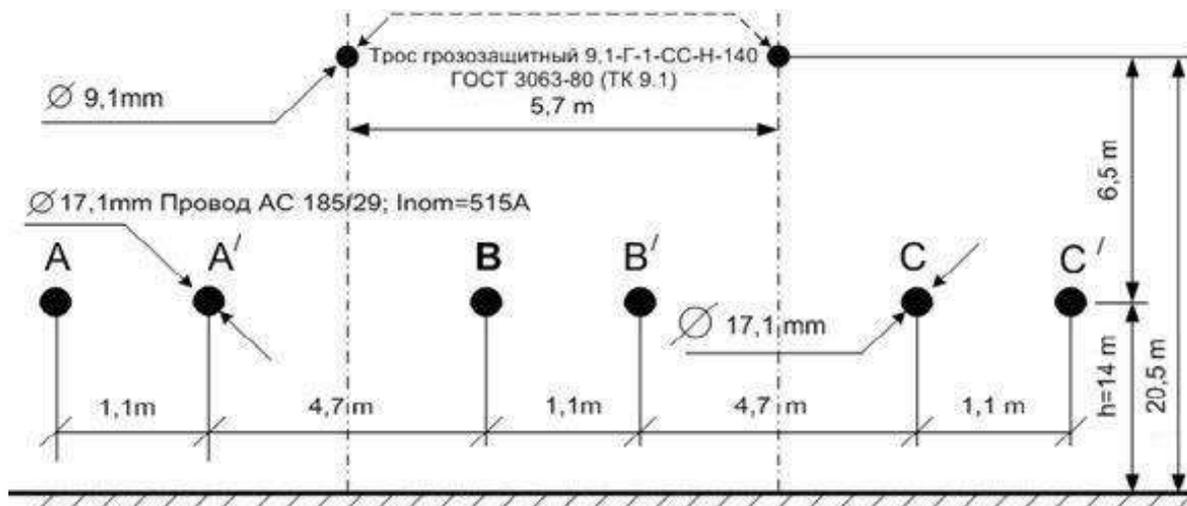


Рисунок 1.19 – Поперечное сечение трехфазной многопроводной ЛЭП 110 кВ

### 1.3.2 Содержание и требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать титульный лист, название работы и цель работы, исходные данные, результаты расчетов, таблицы и графики, анализ результатов и выводы по работе.

Оформление должно соответствовать ОС ТУСУР 01-2013 "работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления".

#### 1.4 Двухфазное короткое замыкание линии электропередачи

Цель работы – расчет величины фазных токов при двухфазном коротком замыкании ЛЭП.

Работа выполняется в студенческой версии системы ELCUT.

Короткое замыкание (КЗ) – явление в электротехнике, сопровождающееся электрическим соединением (замыканием) между собой двух или трех фаз, фазы на нулевой проводник, замыкание фазного проводника на землю в сетях с глухозаземленной, а также эффективно заземленной нейтралью в трехфазной сети. Кроме того, КЗ является межвитковое замыкание в электрических машинах. Характерными особенностями КЗ является значительное увеличение тока и падение напряжения. Рост тока происходит до значений, превышающих номинальный в несколько раз.

Вероятность возникновения однофазных коротких замыканий наиболее высока и составляет более 60% от общего количества КЗ. Двухфазные КЗ, в том числе на землю, возникают реже, вероятность возникновения данной аварийной ситуации - 20%. Трехфазные КЗ встречаются достаточно редко, вероятность их возникновения – 10%.

Основной причиной возникновения КЗ является нарушение изоляции оборудования электроустановок, в том числе кабельных и воздушных линий электропередач (проведении земляных работ, старение изоляционного покрытия опорного изолятора, падение дерева на провода воздушной линии электропередач).

Для защиты от КЗ, как аварийного режима работы оборудования, в электроустановках распределительных подстанций используют различные защитные устройства. Основная цель всех устройств релейной защиты – это отключение выключателя (или нескольких), которые питают участок сети, на котором возникло короткое замыкание. В электроустановках напряжением 6–35 кВ для защиты линий электропередач от КЗ используют максимально-токовую защиту. Для защиты линий 110 кВ используется дифференциально-

фазная защита, как основная защита линий. Кроме того, для защиты ЛЭП 110 кВ в качестве резервных защит используются дистанционная защита и земляная защита. В низковольтных сетях для защиты цепей используются автоматические выключатели.

### 1.4.1 Задание на работу

На рисунке 1.20 приведены конструкция опоры ЛЭП и фазного провода, а на рисунке 1.21, моделируемое место КЗ.

1. Рассчитать погонные параметры ЛЭП.
2. Реализовать принципиальную схему соединения фазных обмоток.
3. Рассчитать величины фазных токов при двухфазном коротком замыкании.
4. Сформировать выводы по работе.
5. Оформить отчет.

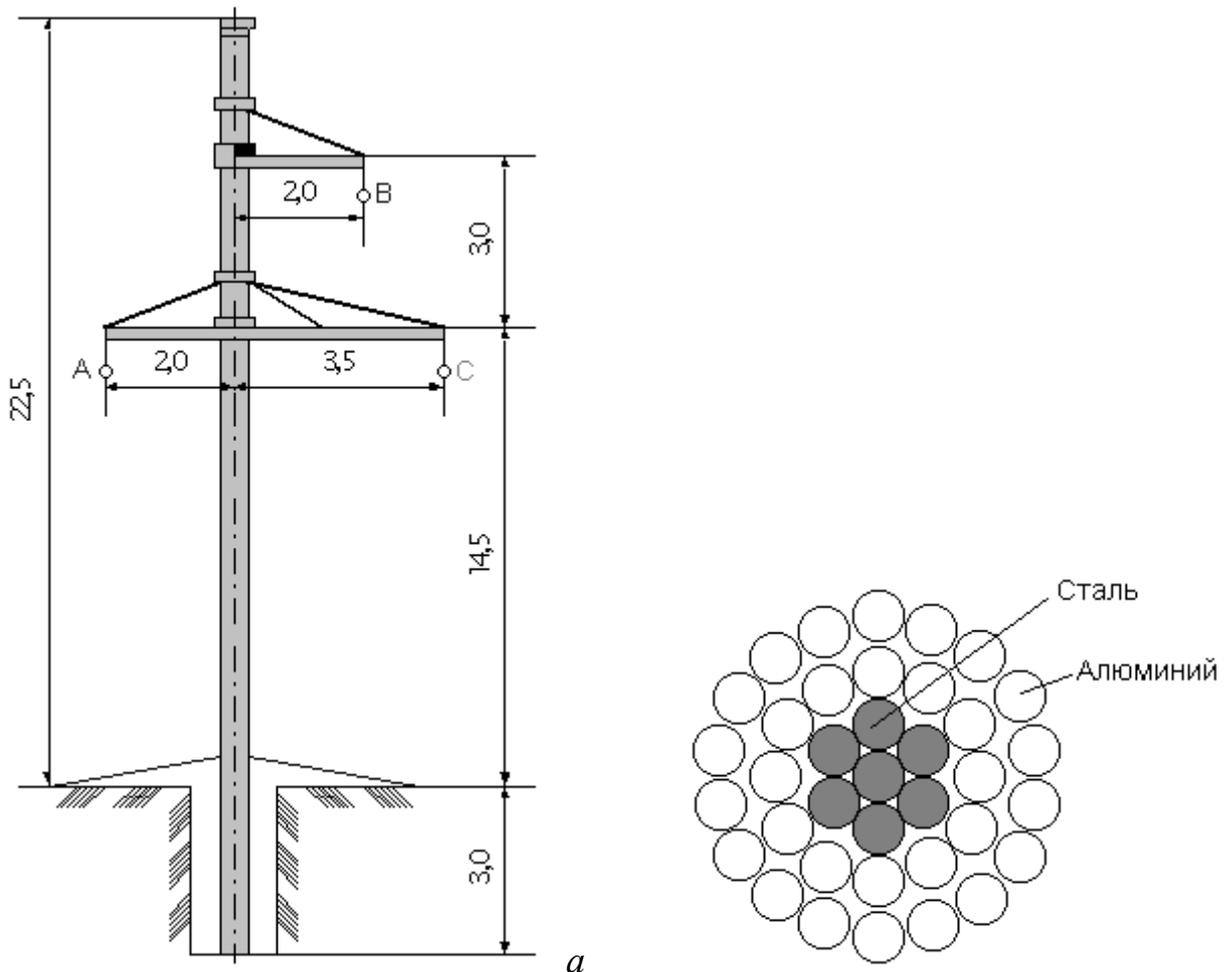


Рисунок 1.20 – Конструкция: опоры (а), провода (б)

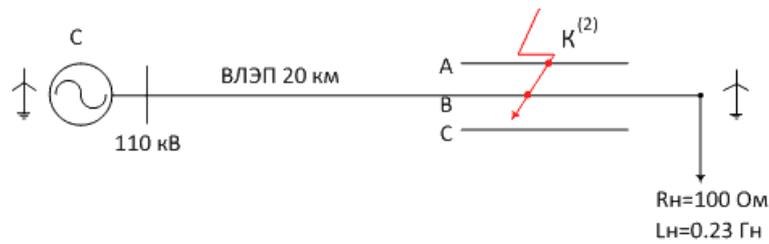


Рисунок 1.21 – Схема короткого замыкания ЛЭП

### 1.4.2 Методические указания к работе

В работе использовать следующие параметры для моделирования:

- Номинальное напряжение сети (действ.)  $U_{\text{НОМ}} = 110$  кВ.
- Номинальный ток (действ.)  $I_{\text{НОМ}} = 440$  А.
- Длина линии  $l = 20$  км.
- Параметры нагрузки  $R_{\text{н}} = 100$  Ом;  $L_{\text{н}} = 0.23$  Гн.

Тип задачи: плоская задача нестационарного магнитного поля.

Кроме полевой части в задаче необходимо учитывать и цепную часть, где представлена схема соединения фазных обмоток источника питания, нагрузки, элементов электрической цепи (рисунок 1.22) и ключ (рисунок 1.23). Ключ представляет собой блок ELCUT с переменным во времени сопротивлением. Зависимость сопротивления от времени реализована через функцию  $R(T(t))$  (сопротивление зависит от температуры, которая меняется во времени по заданному закону).

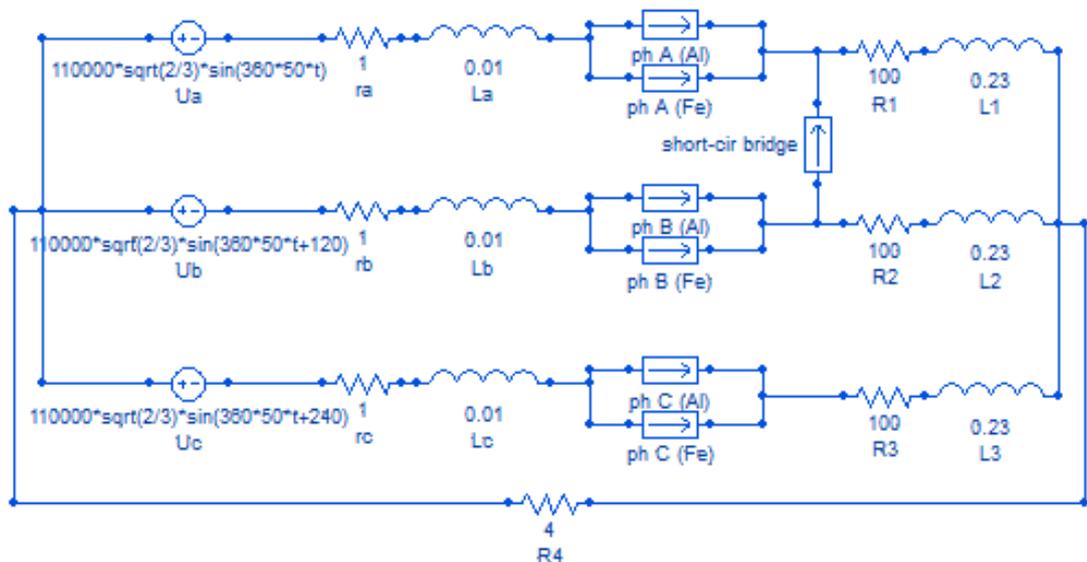


Рисунок 1.22 – Принципиальная схема соединения фазных обмоток



Рисунок 1.23 – Настройки элемента «ключ» в ELCUT

### 1.4.3 Содержание и требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать титульный лист, название работы и цель работы, исходные данные, результаты расчетов, таблицы и графики, анализ результатов и выводы по работе.

Оформление должно соответствовать ОС ТУСУР 01-2013 "работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления".

### 1.5 Расчет параметров кабельной линии

Цель работы – определение тока утечки трехфазного фазного силового кабеля.

Работа выполняется в студенческой версии системы ELCUT и TALGAT.

Силовые кабели предназначены для передачи электрического тока от трансформаторной подстанции к потребителю и для распределения его между потребителями. Техническая характеристика кабеля и его устройство зависит от напряжения передаваемого тока и способа его прокладки, применяется в электросетях с напряжением 1–750 кВ.

В работе рассматривается кабель, состоящий из 4 изолированных жил. Исходные данные: напряжение  $U = 250$  В, частота  $f = 50$  Гц. Геометрия задачи приведена на рисунке 1.24. Все размеры указаны в миллиметрах. Тип задачи – электрическое поле переменных токов. Класс задачи – плоская ( $L_z = 1000$  мм).

Координаты – декартовы. Относительная диэлектрическая проницаемость оболочки – 2, электропроводность – 0.001 См·м. Относительная диэлектрическая проницаемость изоляции – 4, электропроводность – 0.00001 См·м. Граничные условия – нулевой потенциал на границе оболочки.

### 1.5.1 Задание на работу

В работе необходимо:

1. В системах TALGAT и ELCUT вычислить погонные параметры кабеля и его волновое сопротивление.
2. Сравнить полученные результаты при учащении сегментации.
3. В системе ELCUT вычислить ток утечки кабеля.
4. Оценить изменение величины тока утечки при изменении частоты в диапазоне 100, 200, 300, 400 Гц.
4. Сформировать выводы по работе.
5. Оформить отчет.

### 1.5.2 Методические указания к работе

При вычислении тока утечки необходимо после расчета выбрать контур – граница оболочки. Затем выбрав интегральный калькулятор выбрать пункт «Кажущийся ток через поверхность».

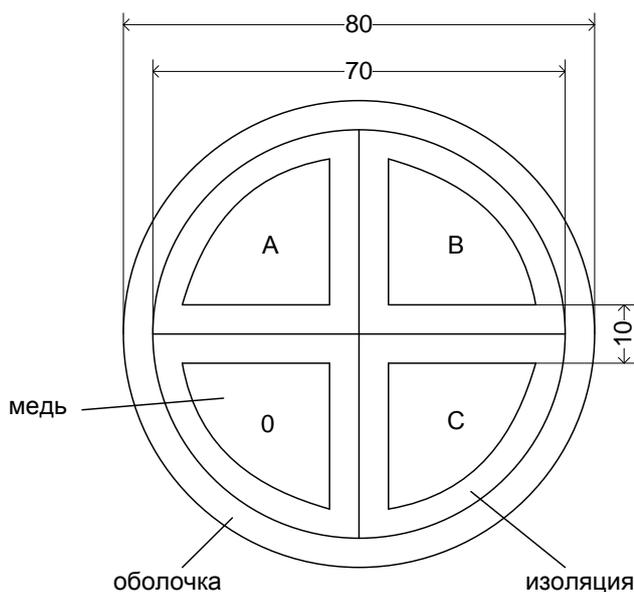


Рисунок 1.24 – Трехфазный силовой кабель

### **1.5.3 Содержание и требования к оформлению отчета**

Отчет должен содержать титульный лист, название работы и цель работы, исходные данные, результаты расчетов, таблицы и графики, анализ результатов и выводы по работе.

Оформление должно соответствовать ОС ТУСУР 01-2013 "работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления".

### **1.6 Оптический кабель на опоре линии электропередачи**

Цель работы – определение наиболее благоприятного места подвеса оптического кабеля на опорах ЛЭП.

Работа выполняется в студенческой версии системы ELCUT.

Волоконно-оптической линией связи на воздушных линиях электропередачи (ВОЛС-ВЛ) называется линия связи, для передачи информации по которой служит оптический кабель (ОК), размещаемый на элементах ВЛ.

Оптические кабели, размещаемые на элементах ВЛ, должны удовлетворять требованиям:

- механической прочности;
- термической стойкости;
- стойкости к воздействию грозových перенапряжений;
- обеспечения нагрузок на оптические волокна, не превышающих допускаемые;
- стойкости к воздействию электрического поля.

Место крепления самонесущего ОК на опоре с учетом его вытяжки в процессе эксплуатации определяется, исходя из условий:

- стойкости оболочки к воздействию электрического поля;
- обеспечения наименьшего расстояния до поверхности земли не менее 5 м независимо от напряжения ВЛ и вида местности;

- обеспечения расстояний от ОКСН до фазных проводов на опоре не менее 0,6 м для ВЛ до 35 кВ; 1 м – 110 кВ; 1,5 м – 150 кВ; 2 м – 220 кВ; 2,5 м – 330 кВ; 3,5 м – 500 кВ; 5 м – 750 кВ при отсутствии гололеда и ветра.

### 1.6.1 Задание на работу

На рисунке 1.25 приведена исследуемая в данной работе опора ЛЭП с указанием всех необходимых размеров и местом предполагаемого подвеса ОК. Необходимо:

1. Построить геометрическую модель опоры.
2. Определить наиболее благоприятное место (зону наименьших потенциалов) для подвеса оптического кабеля исходя из расчета электрического поля.
3. Сформировать выводы по работе.
4. Оформить отчет.

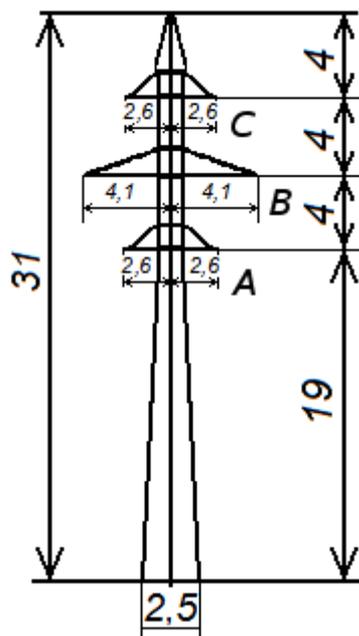


Рисунок 1.25 – Конструкция опоры ЛЭП с указанием её размеров

### 1.6.2 Методические рекомендации к работе

Тип задачи: Плоско-параллельная задача электрического поля переменных токов. Линейное напряжение (действующее)  $U_{л} = 110$  кВ. Для задания

удаленных границ ( $U = 0$ ) использовать инструмент «Половина круга ( $180^\circ$ )». Шаг дискретизации: на месте пересечения оси  $x$  и удаленной границы –15; в начале координат – 5; фазы, изоляторы, грозозащитный трос – 1 (рисунок 1.26).

### 1.6.3 Содержание и требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать титульный лист, название работы и цель работы, исходные данные, результаты расчетов, таблицы и графики, анализ результатов и выводы по работе.

Оформление должно соответствовать ОС ТУСУР 01-2013 "работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления".

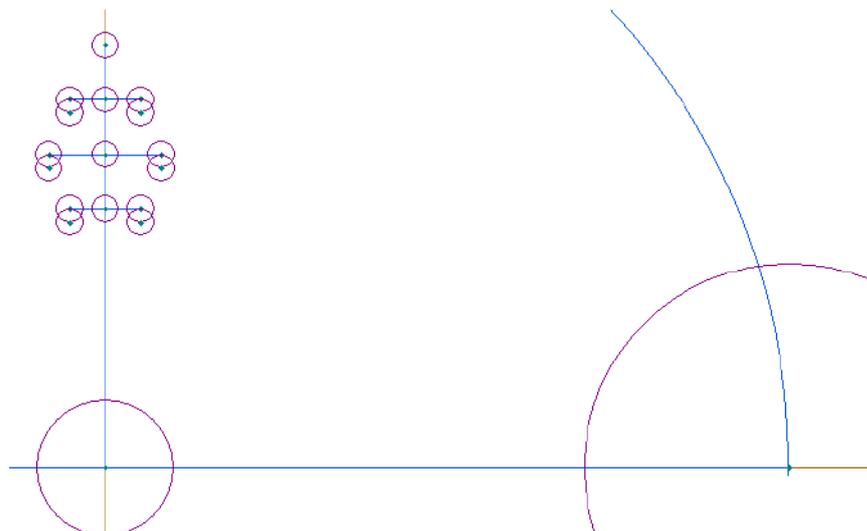


Рисунок 1.26 – К заданию шага дискретизации

## 1.7 Заземление

### 1.7.1 Общие положения

Защиту от поражения электрическим током при повреждении изоляции обеспечивают защитное заземление, зануление, выравнивание потенциалов, уравнивание их с помощью системы защитных проводников, защитное отключение, изоляция нетоковедущих частей, электрическое разделение сети, малое напряжение, контроль изоляции, изолирующие защитные средства, а в сети с изолированной нейтральной точкой также компенсация токов замыкания на землю. Эти способы можно использовать в сочетании друг с другом.

Наиболее распространены защитное заземление и зануление.

В общем виде системы заземления предназначены для выполнения нескольких функций. Они могут функционировать отдельно или вместе и обеспечивать одну или несколько следующих функций:

- защиту людей от поражения электрическим током;
- защиту оборудования от повреждения электрическим током;
- нулевая точка отсчета потенциала для слаботочных сигналов;
- обеспечение требуемого уровня электромагнитной совместимости.

Суть заземления заключается в соединении заземляемых частей с заземлителем, т.е. с металлическим предметом, находящимся в непосредственном соприкосновении с землей, или с группой таких предметов. Чаще всего это стержни из угловой стали, забитые в землю вертикально и соединенные под землей приваренной к ним стальной полосой. Заземление частей электроустановки для обеспечения электробезопасности называют защитным заземлением. Бывают также грозозащитное (от грозových перенапряжений в проводке или воздушной линии), молниезащитное и рабочее (необходимое для работы установки) заземления. Можно выделить также вспомогательные заземления в составе иных защитных мероприятий электробезопасности, например повторные заземления нулевого провода в системе технического способа «зануление». Заземления разных назначений, устроенные на одной площадке, как правило, конструктивно и электрически совмещают.

Защитное заземление применяют в электроустановках напряжением выше 1000 В с любым режимом работы нейтрали и в установках до 1000 В с изолированной от земли нейтральной точкой, а зануление применяют в установках напряжением до 1000 В с заземленной нейтралью (в частности, в сетях 380/220 В). Благодаря защитному заземлению напряжение, под которое может попасть человек, прикоснувшийся к заземленной части, значительно снижается.

Заземляют открытые (доступные прикосновению) металлические нетоковедущие части, на которые напряжение может попасть в результате повреждения изоляции. Это корпуса трансформаторов и других электроприемников, приводы выключателей и других коммутационных аппаратов, каркасы распределительных щитов, пультов и щитов управления, шкафов с электрооборудованием, металлические оболочки кабелей, проводов, стальные трубы для электропроводки, тросы, на которых подвешены провода, кожухи шинопроводов, короба и лотки, арматура железобетонных опор и их провололочные оттяжки. Чтобы уравнивать потенциалы в помещениях, где применяется заземление или зануление, заземляют (зануляют) также все так называемые сторонние проводящие части (строительные и производственные металлоконструкции и трубы водопровода и центрального отопления). Однако не заземляют и не зануляют: изоляторные крюки на деревянных опорах, если на них не проложен кабель с заземленной броней и не требуется заземление крюков на данной опоре для грозозащиты; металлические скобы для крепления проводов и другие детали размером не более 50x50 мм, недоступные для прикосновения; трубы для прохода через стены, в том числе при выполнении его кабелем. Не заземляют и металлические корпуса электрооборудования, установленного на заземленных или зануленных частях станков, если на опорных поверхностях предусмотрены места, зачищенные для хорошего контакта. На движущихся частях станка электрооборудование зануляют, поскольку оно отделено от неподвижной части станка смазочной пленкой.

По ГОСТ 30331.3-95 «Электроустановки зданий. Ч. 5.1. Требования по обеспечению безопасности. Защита от поражения электрическим током» требуется заземление или зануление открытых нетоковедущих частей, в частности металлических корпусов стационарных и переносных электроприемников, в любых зданиях (производственных, жилых) независимо от степени опасности поражения током в данном помещении, если номинальное напряжение превышает 50 В переменного тока или 120 В постоянного. Если же напряжение меньше, но больше 25 В переменного тока

или 60 В постоянного, то так называемая защита от косвенного прикосновения (к корпусу оборудования с поврежденной изоляцией), в частности заземление или зануление, требуется в помещениях с повышенной опасностью или в особо опасных и наружных электроустановках. При меньшем напряжении заземление или зануление необходимо только во взрывоопасных зонах и для электрооборудования электросварки.

### 1.7.2 Расчет заземлителей

Как было отмечено выше, заземление осуществляется посредством заземляющего устройства, состоящего из заземлителей и соединительных проводов. Заземлители представляют собой металлические проводники (или группы проводников, соединенных параллельно) в виде шаров, труб, стержней и пр., которые располагаются в земле и создают непосредственный контакт с ней. Причинами стекания тока в землю являются: замыкание токоведущей части на заземленный корпус электрического оборудования; падение провода на землю; использование земли в качестве провода и т.п. Во всех этих случаях происходит резкое снижение потенциала (т.е. напряжения относительно земли)  $\varphi_3$ , В, заземлившейся токоведущей части до значения  $\varphi_3 = I_3 R_3$ , где  $I_3$  – ток, стекающий в землю, А;  $R_3$  – сопротивление, которое этот ток встречает на своем пути, т.е. сопротивление заземлителя растеканию тока, Ом.

Множество заземлителей условно делят на две группы. К первой группе относят простые заземлители, состоящие всего из одного электрода, выполненного, например, в виде полусферы, вертикального или горизонтального кругового цилиндра, круглой пластины, тора (кольца) и т.д. (одионочные заземлители) Вторая группа включает сложные заземлители, состоящие из различных комбинаций горизонтальных и вертикальных электродов в виде стержней, уголков, полос и т.п. (групповые заземлители). Если все электроды (элементы) сложного заземлителя расположены горизонтально и образуют в плане замкнутый контур с внутренними перемычками, то его называют заземляющей сеткой, а при наличии также и

вертикальных электродов – комбинированным заземлителем.

### 1.7.2.1 Одиночные заземлители

Строгие математические методы решения задачи об электрическом поле и основных характеристиках простых заземлителей разработаны лишь для немногих частных случаев их геометрии, например для некоторых тел вращения с осью, перпендикулярной поверхности земли: полусфера, вытянутый и сплюснутый эллипсоид, тор.

Стекание тока в землю сопровождается возникновением некоторых потенциалов на заземлителе, в земле вокруг заземлителя, а, следовательно, и на поверхности земли. Рассмотрим, от чего зависят значения этих потенциалов, как они изменяются при изменении расстояния до заземлителя, т.е. получим уравнение потенциальной кривой.

#### 1.7.2.1.1 Шаровый заземлитель

Пусть имеется шаровой заземлитель радиусом  $r$ , м, погруженный в однородную землю на бесконечно большую глубину (т.е. можно пренебречь влиянием поверхности земли). Через этот шар в землю стекает ток  $I_3$ , который подается к заземлителю с помощью изолированного проводника (рисунок 1.27). Запишем уравнение для потенциала  $\varphi$ , в некоторой точке объема земли  $S$ , отстоящей от центра заземлителя на расстоянии  $x$  или, иначе говоря, уравнение потенциальной кривой. Поскольку земля однородна, ток в земле будет растекаться от заземлителя равномерно и симметрично (во все стороны) и плотность его будет убывать по мере удаления от земли. Поэтому на расстоянии  $x$  плотность тока  $j$ , А/м<sup>2</sup> будет равна  $j = I_3 / S = I_3 / 4\pi x^2$ . В линейной и изотропной среде плотность тока связана с напряженностью электрического поля в данной точке по закону Ома  $j = E/\rho$  (при этом линии напряженности совпадает с линиями плотности тока). Поскольку  $E = dU/dx$  (напряженность равна падению напряжения, отнесенного к единице длины), то

$$\varphi = \int_x^{\infty} dU = \int_x^{\infty} E dx = \int_x^{\infty} j \rho dx = \int_x^{\infty} \frac{I_3 \rho}{4\pi x^2} dx.$$

Решив интеграл, получим требуемое уравнение потенциальной кривой

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{4\pi x}.$$

Потенциал  $\varphi = 0$  будет иметь точка, отстоящая от заземлителя на расстоянии  $x = \infty$ . Практически область нулевого потенциала начинается на расстоянии порядка 20 м от заземлителя. Потенциал точек на поверхности земли в данном случае равен нулю (так как  $x = \infty$ ). Максимальный потенциал будет при наименьшем значении  $x$ , равном радиусу заземлителя, т.е. непосредственно на поверхности заземлителя (потенциал шарового заземлителя):

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{4\pi r}.$$

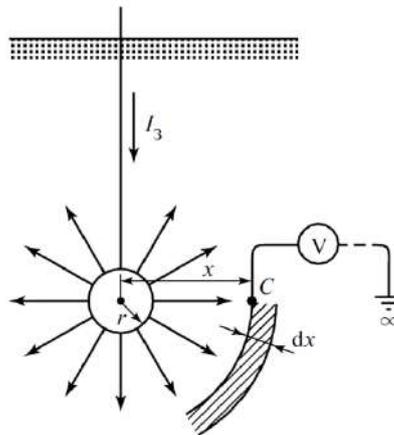


Рисунок 1.27 – Шаровой заземлитель, погруженный в землю на большую глубину

На практике заземлители погружают в землю на относительно небольшую глубину, при которой ее поверхность оказывает влияние на электрическое поле, искажая линии тока<sup>1</sup>. Для потенциалов точек на поверхности земли, например,

<sup>1</sup> Согласно Инструкции по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций (СО 153-34.21.122-2003) заземляющие электроды должны располагаться на глубине не менее 0,5 м за пределами защищаемого объекта

точки  $D$  (рисунок 1.28), можно записать

$$m' = n' = \sqrt{x^2 + t^2},$$

а уравнение, определяющее ее потенциал, т.е. уравнение потенциальной кривой для точек на поверхности земли, имеет вид:

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi} \frac{1}{m'} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2 + t^2}}. \quad (1.15)$$

Потенциал заземлителя  $\varphi_3$ , т.е. максимальный потенциал, будет при  $y = 0$  и, следовательно, при  $x = r$  (рисунок 1.28):

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{4\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{\sqrt{r^2 + 4t^2}} \right).$$

Если  $4t^2 \gg r$  (что часто выполняется на практике), то

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{4\pi} \left( 1 + \frac{r}{2t} \right).$$

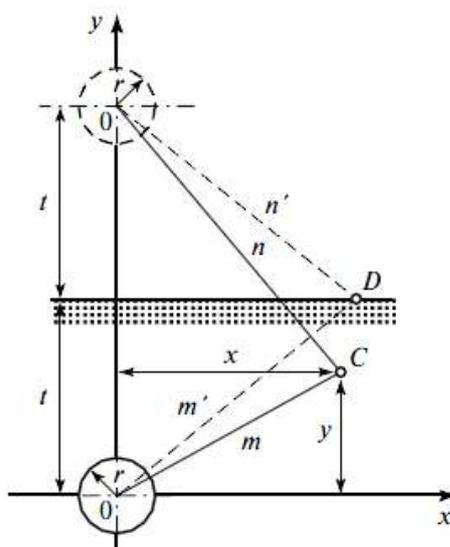


Рисунок 1.28 – Шаровой заземлитель вблизи поверхности земли и его зеркальное изображение

Шаровой заземлитель на поверхности земли, т.е. заглубленный так, что его центр находится на уровне земли (рисунок 1.29), называется полушаровым заземлителем. Для такого заземлителя уравнение потенциальной кривой на поверхности земли (так же, как и в объеме земли) можно получить из уравнения (1.15), приняв  $t = 0$ , получим

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi x}. \quad (1.16)$$

Потенциал заземлителя  $\varphi_3$  при радиусе заземлителя  $r = x$ , определяется из уравнения

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi r}. \quad (1.17)$$

Разделив (1.16) на (1.17), получим

$$\varphi = \varphi_3 r \frac{1}{x}.$$

Обозначив  $I_3 r = k$ , получим уравнение равносторонней гиперболы

$$\varphi = k \frac{1}{x}.$$

Следовательно, потенциал на поверхности земли вокруг полушарового заземлителя изменяется по закону гиперболы, уменьшаясь от максимального значения  $\varphi_3$  до нуля по мере удаления от заземлителя.

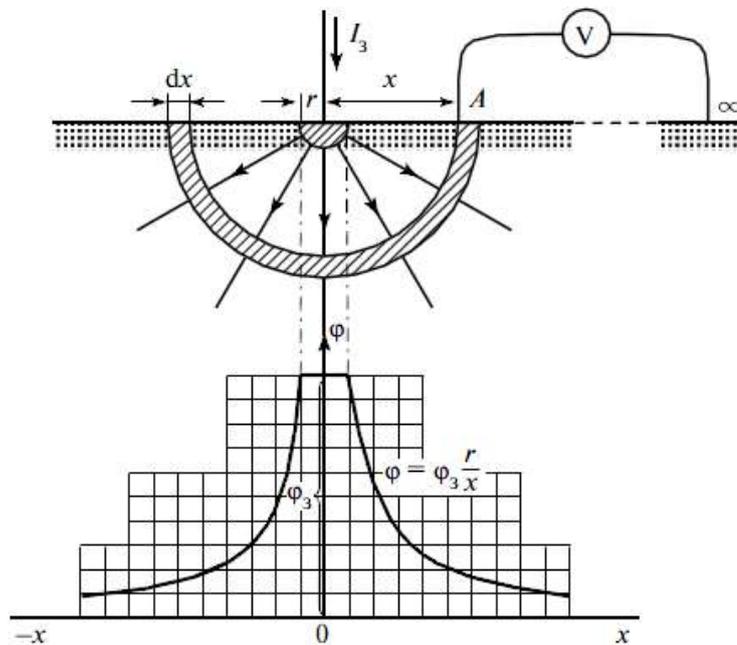


Рисунок 1.29 – Распределение потенциала на поверхности земли вокруг полушарового заземлителя

### 1.7.2.1.2 Стержневой заземлитель

Рассмотрим стержневой вертикальный заземлитель круглого сечения

длиной  $l$  и диаметром  $d$ , погруженный в землю так, что его верхний конец находится на уровне земли (рисунок 1.30). По заземлителю стекает ток  $I_3$ . Получим выражение для расчета потенциала точек на поверхности земли и потенциала заземлителя. Интегрирование по всей длине стержневого заземлителя (от 0 до  $l$ ) дает уравнение потенциальной кривой

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}.$$

Потенциал заземлителя  $\varphi_3$  определяется при  $x = 0,5d$ :

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{(0,5d)^2 + l^2} + l}{0,5d}.$$

Поскольку  $0,5d \ll l$ , то первым слагаемым под корнем можно пренебречь. В результате, получим

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}.$$

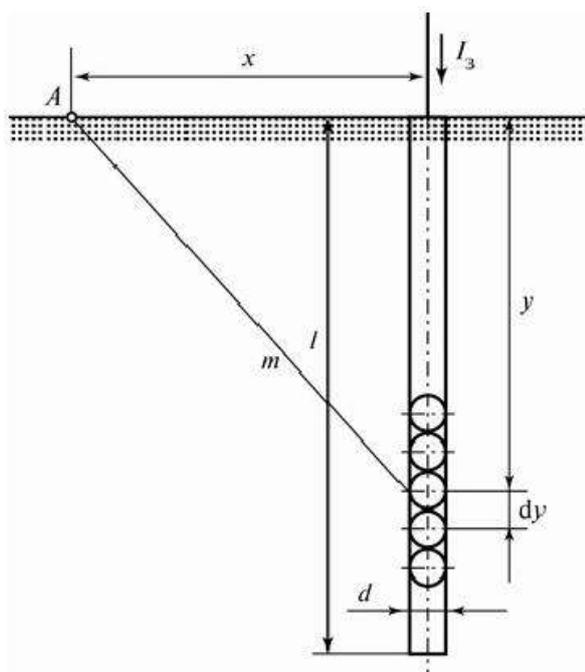


Рисунок 1.30 – Стержневой заземлитель

### 1.7.2.1.3 Дисконный заземлитель

Дисконный заземлитель – круглая пластина диаметром  $D$ , расположенная на поверхности земли, рисунок 1.31. Распределение потенциала на поверхности

земли вдоль радиуса диска описывается уравнением

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{\pi D} \arcsin \frac{D}{2x}.$$

Тогда потенциал заземлителя определяется при  $x = 0,5D$  и вычисляется по формуле

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{2D}.$$

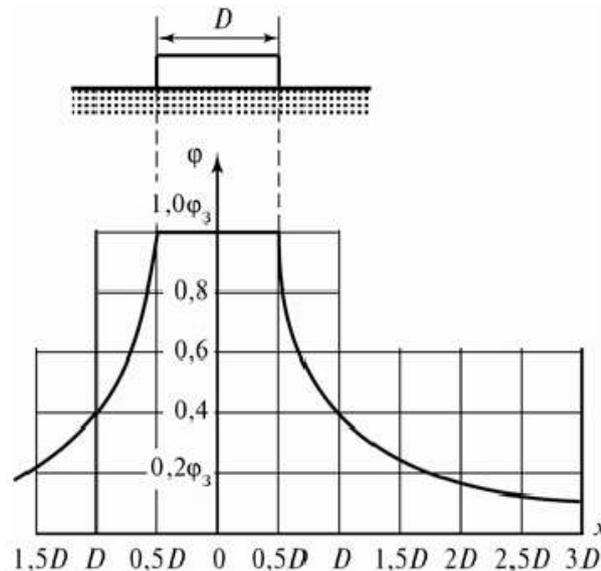


Рисунок 1.31 – Распределение потенциала на поверхности земли вокруг дискового заземлителя

У протяженного заземлителя круглого сечения (стержень, провод и т.п.), находящегося на поверхности земли и заглубленного так, что продольная ось его совпадает с поверхностью земли (рисунок 1.32), изменения потенциальной кривой различны в разных направлениях. Наиболее резко потенциал спадает вдоль оси заземлителя (рисунок 1.32а) а наиболее плавно – поперек оси по линии, проведенной через его середину (рисунок 1.32б). Уравнения потенциальных кривых этого заземлителя имеют следующий вид. Вдоль оси заземлителя (по оси  $x$ ):

$$\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{l^2 + d^2} + 2x}{\sqrt{l^2 + d^2} + 2x - 2l}, \quad (1.18)$$

где  $l$  и  $d$  – длина и диаметр сечения заземлителя. При  $l \gg d$  (что обычно имеет

место в практике) уравнение упрощается и примет вид:

$$\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{2x+l}{2x-l}.$$

Поперек оси заземлителя (по оси  $y$ )

$$\varphi_y = \frac{I_3 \rho}{\pi l} \ln \frac{\sqrt{l^2 + 4y^2} + l}{2y}. \quad (1.19)$$

Потенциал заземлителя будет при наименьшем значении  $x$ , т.е. при  $x = 0,5l$ , если  $\varphi_3$  вычисляется из уравнения (1.18), или при наименьшем значении  $y$ , т.е. при  $y = 0,5d$  – из уравнения (1.19):

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}.$$

Эквипотенциальные линии на поверхности земли вокруг протяженного заземлителя приближаются по форме к эллипсам, а на большом расстоянии – к окружностям (рисунок 1.32в).

#### 1.7.2.1.4 Метод электростатической аналогии

Известно, что между соотношениями, характеризующими электростатическое поле в диэлектрике, и соотношениями, характеризующими стационарное электрическое поле постоянных токов (а с некоторым приближением – и переменных токов 50 Гц) в проводящей среде, существует формальная аналогия. На этом основан метод электростатической аналогии, позволяющий в ряде случаев (при одинаковой конфигурации проводящих тел) решать задачи поля токов, пользуясь готовыми решениями задач электростатики, и наоборот.

В частности, на основе этого метода в ряде случаев довольно просто получить формулы для расчета сопротивлений растеканию тока заземлителей отдельных типов, сопротивлений протеканию тока между электродами и т.п. При этом формула для определения сопротивления получается путем замены  $C$  на  $1/R$  и  $\varepsilon$  на  $1/\rho$  в соответствующей формуле, по которой рассчитывается

емкость тела такой же конфигурации, как и заземлитель:

$$R = \varepsilon\rho / C,$$

где  $R$ , Ом, – сопротивление заземлителя растеканию тока в однородной среде с удельным сопротивлением  $\rho$ , Ом·м;  $C$ , Ф, – емкость рассматриваемой системы тел (заземлителя) в однородной среде с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ , Ф/м.

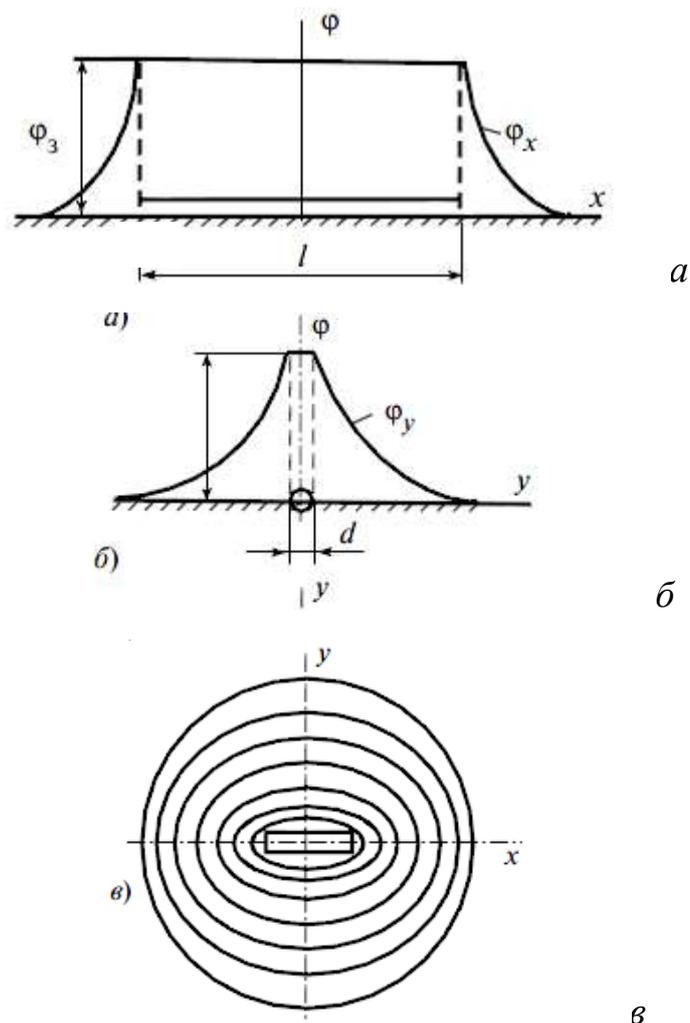


Рисунок 1.32 – Распределение потенциала на поверхности земли вокруг протяженного заземлителя круглого сечения, расположенного на поверхности земли: *а* – потенциальная кривая вдоль оси заземлителя; *б* – потенциальная кривая в плоскости, перпендикулярной оси заземлителя и пересекающей его в середине; *в* – эквипотенциальные кривые на поверхности земли вокруг заземлителя

Для этой цели используют известные в электростатике формулы, определяющие емкость уединенного проводника, расположенного в

безграничном пространстве, емкость уединенного проводника, расположенного вблизи бесконечной непроницаемой плоскости, емкость между уединенным проводником и расположенной вблизи бесконечной проводящей плоскостью; емкость между двумя проводниками (конденсаторная емкость).

Сопротивление растеканию полушарового заземлителя радиусом  $r$ , получим с использованием метода зеркального отображения (рисунок 1.33), полагая, что воздушное пространство над поверхностью земли заполнено средой с таким же, как у земли, удельным сопротивлением  $\rho$ . В этом случае мы имеем дело с шаром, находящимся в однородной безграничной среде. Однако действительный электрод является полушаром, емкость его в 2 раза меньше, а сопротивление растеканию в 2 раза больше, чем целого шара, т.е. искомое сопротивление растеканию тока для полушарового заземлителя

$$R_0 = \rho / 2\pi r.$$

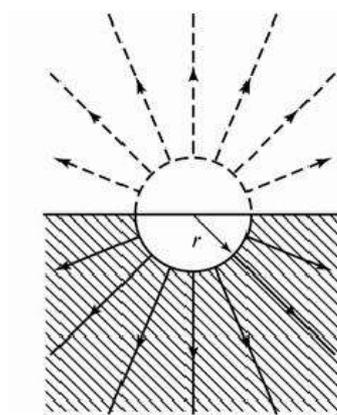
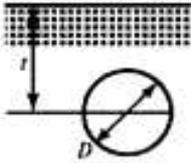
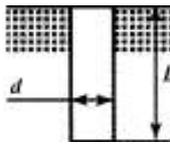
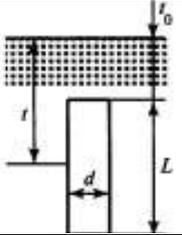
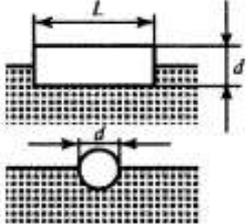
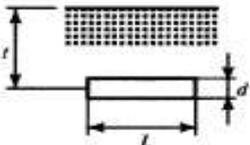
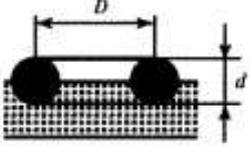
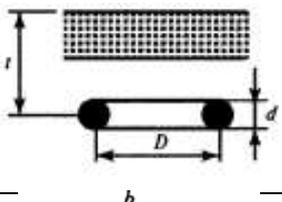
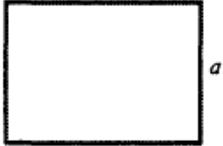
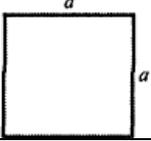
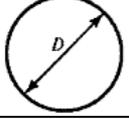
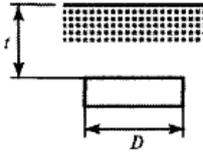
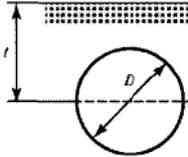
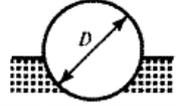
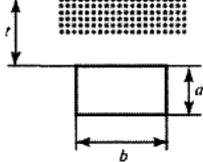


Рисунок 1.33 – Полушаровой заземлитель, расположенный у поверхности земли

В таблице 1.6 сведены формулы для вычисления сопротивлений одиночных заземлителей (электродов) растеканию тока в однородной земле, а в таблице 1.7 – формулы для вычисления емкостей некоторых уединенных проводников в однородной среде.

Таблица 1.6 – Формулы для вычисления сопротивлений одиночных заземлителей растеканию тока в однородной земле

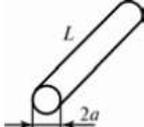
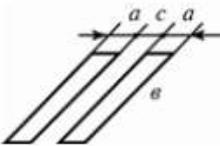
Тип заземлителя	Схема	Формула	Условия применения
Шаровой в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi D} (1 + D/4t)$	$2t \gg D$
Полушаровой у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{\pi D}$	–
Стержневой круглого сечения (трубчатый) или уголкового у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{2L}{d}\right)$	$L \gg d$ см. прим. 2
То же, в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + L}{4t - L}$	$L \gg d$ , $t_0 \gg 0,5$ м см. прим. 2
Протяженный по поверхности земли (стержень, труба, полоса, кабель и тп.)		$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln\left(\frac{2L}{d}\right)$	$L \gg d$ см. прим. 3
То же, в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{L^2}{td}\right)$	$L \gg d, L \gg 4t$ см. прим. 3
Кольцевой на поверхности земли		$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln\left(\frac{8D}{d}\right)$	$D \gg d$ см. прим. 3
Кольцевой в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left[ \ln\left(\frac{8D}{d}\right) + \frac{\pi D}{4t} \right]$	$D \gg d, D \ll 2t$ см. прим. 3
		$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln\left(\frac{4\pi D^2}{td}\right)$	$D \gg d, D \gg 2t$ см. прим. 3
Прямоугольная пластина на поверхности земли		$R = \frac{\rho}{\pi a} \ln\left(\frac{4a}{b}\right)$	–

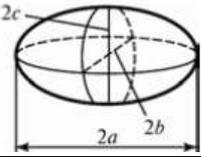
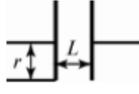
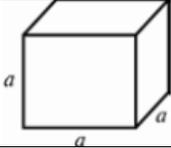
Квадратная пластина на поверхности земли		$R = 0,44 \frac{\rho}{a}$	–
Круглая пластина на поверхности земли		$R = \frac{\rho}{2D}$	–
Круглая пластина в земле		$R = \frac{\rho}{4D} \times \left( 1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{D}{\sqrt{16t^2 + D^2}} \right)$	$2t \gg D$
Круглая пластина, поставленная на ребро, в земле		$R = \frac{\rho}{4D} \left( 1 + \frac{D}{2\pi t} \right)$	$t > 0,5d$
Круглая пластина, поставленная на ребро, у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{2D}$	–
Пластина, поставленная на ребро, в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi a} \left( \ln \left( \frac{4a}{b} \right) + \frac{a}{4t} \right)$	$2t \gg a$

Примечания:

1. В формулах  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление земли, Ом·м (1 Ом·м – сопротивление куба земли с ребром 1 м); геометрические размеры – в метрах,  $R$  – в омах.
2. Для уголка с шириной полоски  $b$  принимать  $d = 0,95b$ .
3. Для полосы с шириной  $b$  принимать  $d = 0,5b$ .

Таблица 1.7 – Формулы для вычисления сопротивлений одиночных заземлителей растеканию тока в однородной земле

Проводник	Изображение проводника	Формула емкости	Условия применения
Уединенная плоская металлическая пластина прямоугольной формы		$C_0 \approx \frac{4\pi\epsilon a}{\ln \frac{4a}{b}}$	$a/b > 1,25$
Уединенный прямолинейный провод конечной длины		$C_0 \approx \frac{4\pi\epsilon L}{\ln \frac{2L}{a} - 1}$	–
Уединенный проводник в виде двух соединенных между собой одинаковых прямоугольных компланарных пластин (лежащих в одной плоскости)		$C_0 \approx \frac{4\pi\epsilon a}{\ln \frac{4a}{b} + \frac{a}{2c}}$	$2c \geq a$

Уединенный проводник в виде трехосного эллипсоида		$C_0 \approx \frac{4\pi\epsilon a \left(1 - \frac{b}{2a} - \frac{c}{2a}\right)}{\ln \frac{2a}{b}}$	$c > 0,7b$ $b < 0,5a$
Два коаксиальных круговых диска (конденсатор с круглыми обкладками)		$C_0 \approx \frac{4\epsilon r}{1 - \frac{2}{\pi} \arctg \frac{L}{r}}$	$L/r > 1$
Уединенный металлический куб		$C_0 \approx 4\pi\epsilon a \cdot 0,66$	–

Примечания:

1. В формулах:  $C_0$  – емкость уединенного проводника,  $\Phi$ ;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды; геометрические размеры – в метрах.
2. Емкостью уединенного проводника называют скалярную величину, характеризующую способность проводника накапливать электрический заряд и равную отношению заряда проводника к его потенциалу при условии, что все другие заряженные проводники бесконечно удалены.

### 1.7.2.1.5 Задачи для решения

**Задача 1.** Ток  $I_3 = 100$  А стекает в землю через металлический предмет неправильной формы, который может быть условно уподоблен шару радиусом  $r = 0,5$  м. Предмет погружен в землю на глубину  $t_1 = 3$  м; ток к нему подается по изолированному проводу. Удельное сопротивление земли  $\rho = 100$  Ом·м. Требуется определить потенциал  $\varphi_C$  на металлическом трубопроводе  $C$ , проложенном в земле на глубине  $t_2 = 4$  м и на расстоянии по горизонтали от центра шара  $x = 3$  м (рисунок 1.34).

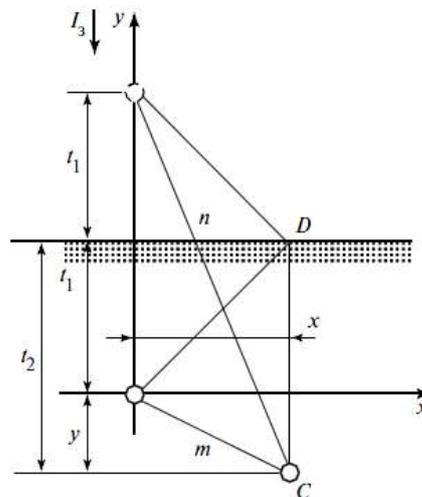


Рисунок 1.34 – К определению потенциалов на трубопроводе ( $C$ ), на поверхности земли ( $D$ ) и на заземлителе, с которого в землю стекает ток

**Задача 2.** С металлического шара радиусом  $r = 0,5$  м, погруженного в землю на глубину  $t_1 = 3$  м, стекает ток  $I_3 = 80$  А, который подается к шару по изолированному проводу (рисунок 1.8). Требуется определить потенциал  $\varphi_D$  на поверхности земли в точке  $D$  на расстоянии  $x = 3$  м от вертикали, проходящей через центр шара, и потенциал заземлителя (шара)  $\varphi_3$ . Удельное сопротивление земли  $\rho = 90$  Ом·м.

**Задача 3.** Доказать, что сопротивление вертикального стержневого заземлителя  $R$  при увеличении его длины  $L$  уменьшается больше, чем при увеличении его диаметра  $d$ . Требуется привести числовые значения сопротивлений и построить кривые (графики) зависимостей  $R = f(L)$  и  $R = f(d)$ . За исходный взять стержневой заземлитель круглого сечения диаметром  $d = 0,01$  м. Первоначальное заглубление заземлителя в землю принять равным  $L = 2$  м. Кратность увеличения размеров – 1, 2, 3, 4. Удельное сопротивление грунта считать равным  $\rho = 100$  Ом·м.

**Задача 4.** Электрический ток стекает в землю через полушаровый заземлитель, рисунок 1.35. Земля однородная, ее удельное сопротивление  $\rho$ . Требуется вывести следующие уравнения:

- потенциальной кривой (показывающей изменение потенциала на поверхности земли);
- сопротивления заземлителя растеканию тока (сопротивление полушарового заземлителя);
- напряжения прикосновения для человека, прикасающегося к заземленной токоведущей части;
- напряжения шага для человека, идущего в сторону заземлителя.

**Задача 5.** Известно выражение конденсаторной емкости двух пластин (т.е. емкости между двумя пластинами) в виде дисков диаметром  $D$ , отстоящих друг от друга на расстояние  $L > 0,5D$  (см. таблицу 1.6). Требуется, пользуясь указанным выражением и методом электростатической аналогии, вывести уравнение для сопротивления растеканию тока с одиночного заземлителя в

виде диска, лежащего на поверхности земли, рисунок 1.36.

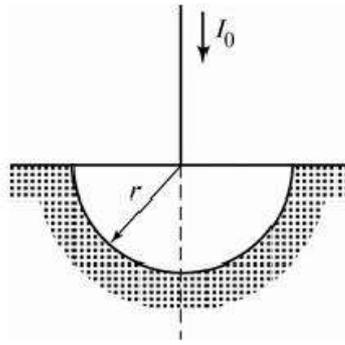


Рисунок 1.35 – Полушаровый заземлитель в земле

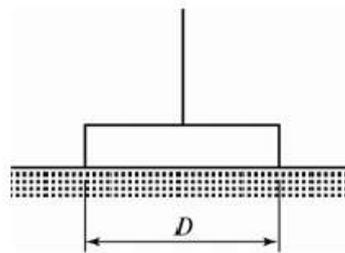


Рисунок 1.36 – Заземлитель в виде круглой металлической пластины, расположенной на поверхности земли

**Задача 6.** Сопротивление растеканию тока  $r_3$  с одиночного стержневого заземлителя круглого сечения, погруженного вертикально в землю у ее поверхности, вычисляется по формуле

$$r_3 = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right),$$

где  $L$  – длина погруженной в землю части электрода, а  $d$  его диаметр. Требуется вывести эту формулу методом электростатической аналогии, используя выражение для емкости уединенного прямолинейного провода конечной длины (см. таблицу 1.6).

**Задача 7.** Из таблицы 1.6 известна формула электрической емкости уединенной плоской металлической пластины прямоугольной формы с размерами  $a$  и  $b$ , расположенной в однородной среде. Требуется, пользуясь этим выражением и методом электростатической аналогии, получить уравнение для вычисления диаметра заземлителя в виде металлического диска, расположенного на поверхности земли и обладающего сопротивлением

растеканию тока, равным сопротивлению растекания прямоугольной пластины, расположенной на земле.

**Задача 8.** Металлический бак в виде прямоугольного параллелепипеда с ребром квадратного основания  $a = 1$  м и высотой  $b = 1,5$  м погружен в землю так, что он возвышается над уровнем земли на высоту  $c = 1$  м, рисунок 1.37. Требуется определить сопротивление стекания в землю электрического тока с этого бака  $r_3$  располагая формулой для вычисления электрической емкости уединенного куба, находящегося в однородной среде (см. таблицу 1.7). Удельное сопротивление земли  $\rho$  принять равным  $100$  Ом·м. Требуется определить сопротивление стекания в землю электрического тока с этого бака  $r_3$  располагая формулой для вычисления электрической емкости уединенного куба, находящегося в однородной среде (см. таблицу 1.6).

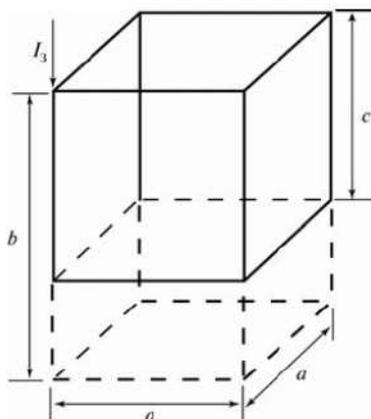


Рисунок 1.37 – Заземлитель в виде металлического бака в форме прямоугольного параллелепипеда, частично погруженного в землю

### 1.7.2.2 Структура и свойства грунта

Грунт представляет собой сложную систему, состоящую из твердых, жидких и газообразных компонентов. Твердая фаза нормальной почвы обычно включает минералы и органические вещества; жидкостная фаза означает водный раствор, а газовая фаза характеризуется наличием воздуха между твердыми частицами. Твердая фаза состоит из основной структуры почвы, жидкая и газовая фазы заполняют пустоты внутри структуры, как показано на рисунке 1.38.

Проводимость почвы строго определяется содержанием воды и

состоянием воды. По расстоянию от твердых частиц и электростатической силе, полученной от твердых частиц, вода в почве может быть отнесена к следующим типам:

**Прочносвязанная вода.** Рядом с поверхностью частиц почвы молекулы воды тесно переплетаются и не могут свободно передвигаться из-за большой интенсивности электростатического поля.

**Рыхлосвязанная вода.** Находясь вдали от частиц почвы, интенсивность электростатического поля сравнительно снижается, поэтому молекулы воды более активны и слабо ориентированы. Этот тип воды по-прежнему в основном зависит от электростатического поля.

**Капиллярная вода.** По мере увеличения расстояния между частицами почвы и молекулами воды, последние в основном находятся под воздействием силы тяжести. Хотя электростатическое поле по-прежнему играет определенную роль, но не является основной функцией.

**Гравитационная вода.** По мере увеличения расстояния между частицами почвы и молекулами воды действие электростатического поля становится незначительным для молекул воды и они контролируются только силой тяжести. Этот тип называется гравитационной водой или обычной подземной водой.

Исследования показали, что проводимость почвы падает при понижении температуры. Это объясняется теорией электрохимии, поскольку электрическая проводимость в почве преимущественно определяется электролитической проводимостью в растворах водоносных пород и почв. Соответственно, удельное сопротивление почвы или породы обычно зависит от степени пористости или целостности, типа электролита и температуры. Металлическая проводимость, электронная полупроводимость и электролитическая проводимость почвы могут возникать только при наличии специфические природных металлов и минералов. Подобно твердой среде, замороженная почва явно отличается от нормальной почвы.

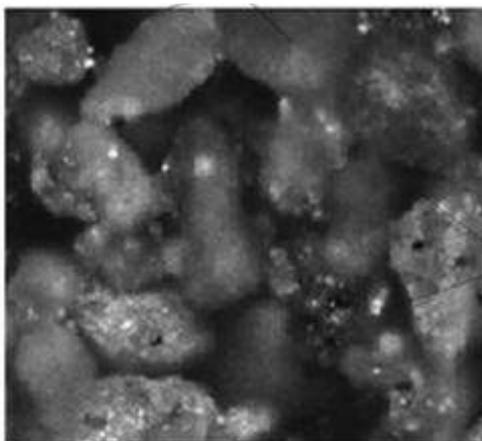


Рисунок 1.38 – Микроструктуры почвы

Из-за зарядов и ионов, притянутых на поверхность частиц почвы, ее можно рассматривать как поливалентный электролит. Проводимость почвы – это вклад как заряженных частиц почвы (известных как коллоидная проводимость частиц, в основном определяемая количеством заряда на поверхности частиц почвы), так и ионов в растворе (известных как проводимость ионов, в основном определяемая скоростью диффузии ионов). При диффузии ионов в почвенный раствор скорость диффузии зависит от сопротивления молекул воды. По мере падения температуры вода становится вязкой и ее диффузия становится медленнее, поскольку сопротивление молекул воды увеличивается. Напротив, ионы подвержены воздействию электрического сопротивления почвы. По мере понижения температуры средняя кинетическая энергия ионов уменьшается, и способность преодолевать электрическое сопротивление почвы также уменьшается, а скорость диффузии замедляется. Таким образом, ионная проводимость снижается, а сопротивление почвы увеличивается по мере падения температуры.

Когда температура почвы уменьшается до  $0^{\circ}\text{C}$  или ниже, большая часть воды в почве постепенно замерзает, и лед (с высоким сопротивлением) заполняет пустоты между частицами почвы в виде небольших зерен или слоев, поэтому проводимость почвы в поперечном сечении уменьшается. Толщина пленки воды покрывающая частицы почвы уменьшается и деятельность молекул воды слабеет. Таким образом, удельное сопротивление замороженной почвы

значительно выше, чем у нормальной почвы. Когда почва охлаждается до гораздо более низкой температуры, большая часть воды, содержащаяся в почве замерзает, и ионная проводимость, создаваемая движением ионов, постепенно исчезает. Наконец, проводимость коллоидных частиц, создаваемых зарядами на поверхности почвы, которые не зависят от температуры, характеризуют эффект насыщения.

Понимание распределения тока в земле является основополагающим понятием для проектирования подходящего заземляющего устройства. Распределение тока в земле имеет частотную зависимость, и соответствующая глубина проникновения тока различной частоты будет отличаться. Более того, распределение тока также определяется электрическими свойствами земли, а именно электрическими свойствами грунта. Основные параметры, характеризующие электрические свойства грунта, являются удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость и магнитная проводимость.

Удельное сопротивление является основным параметром для измерения электропроводности материалов. Это сопротивление между двумя противоположными сторонами единичного кубического материала, измеренное в Ом·м. Как правило, удельное сопротивление материалов может быть измерено устройством, показанным на рисунке 1.39. Для материала с площадью поперечного сечения  $S$  и длиной  $L$ , когда ток  $I$  подается через электроды, расположенные на расстоянии  $\Delta L$  друг от друга, вольтметр используется для измерения напряжения  $\Delta U$  между двумя электродами. Тогда сопротивление материала между двумя электродами определяется с помощью выражения  $R = \Delta U / I$ , а удельное сопротивление материала можно рассчитать с помощью

$$\rho = R \frac{S}{\Delta L} = \frac{\Delta U S}{I \Delta L}.$$

Удельное сопротивление грунта изменяется в широком диапазоне и зависит от типа почвы, содержания воды, температуры, типа и содержания соли, растворенной в почвенной воде, размера и распределения частиц почвы, напряженности распространяемого электрического поля и т.д. Грунт с

удельным сопротивлением в диапазоне от десятков до более чем 5000 Ом·м часто встречается в проектах заземления. Удельное сопротивление менее пористых сред велико, в том числе петросилекс и породы гранита и базальта, осадочные породы компактного известняка и песчаник с удельным сопротивлением от нескольких единиц до нескольких десятков кОм·м. В литературе существует ряд таблиц, показывающих диапазоны удельного сопротивления для различных почв и пород. Более подробные данные доступны в технических руководствах и публикациях.

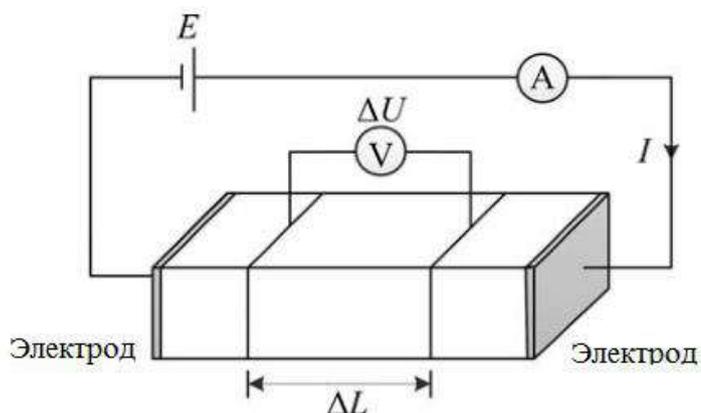


Рисунок 1.39 – Схема измерения удельного сопротивления грунта

Проводимость грунта может быть измерена по ее удельному сопротивлению, поскольку она является его обратной величиной. Из-за различий в структуре, свойствах и минералах образцов почвы разные почвы имеют различную проводимость. Обычно удельное сопротивление грубого грунта (гравийной почвы) выше, чем у мелкого грунта (мягкая глина), но для разных тонких грунтов разница удельного сопротивления велика.

Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  однородной по электрическим свойствам земли равно сопротивлению  $1 \text{ м}^3$  грунта, если обеспечен хороший контакт с подводящими ток проводами по всей плоскости противоположных граней. Оно зависит от структуры грунта, наличия солей и влажности. Рекомендуемые для ориентировочных расчетов приблизительные значения  $\rho$ , Ом·м, приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Значения удельного сопротивления грунта в зависимости от его типа

Тип грунта	$\rho$ , Ом·м
Скальные породы и мерзлый грунт (районов мерзлоты)	1000 – 45000
Гравий, щебень, каменистые почвы	1000 – 4000
Песок (сухой)	300
Песок слабовлажный	400 – 700
Супесь влажная	150
Суглинок	100
Глина	50
Торф	20
Чернозём	20...50
Речная вода	10 – 30
Морская вода	0,2–1

Колебания влажности грунта летом в связи с высыханием сильно влияют на  $\rho$ . Например, для красной глины  $\rho$  уменьшается приблизительно в 13 раз с увеличением влажности от 10 до 20%. Промерзание грунта сильно увеличивает  $\rho$ . Стержневые заземлители рекомендуется забивать ниже глубины промерзания и по возможности ниже уровня грунтовых вод. Однако, учитывая, что значительная часть стержней длиной 2–5 м лежит в зоне, подверженной сезонным колебаниям  $\rho$ , при проектировании заземляющего устройства в формулы подставляют расчетное значение (приблизительно максимальное зимнее) удельного сопротивления земли

$$\rho_p = k_c \cdot \rho,$$

где  $k_c$  – коэффициент сезонности, позволяющий приблизительно учесть увеличение  $\rho$  при промерзании земли.

В таблице 1.9 приведены значения коэффициента сезона при измерении  $\rho$  земли на месте будущего сооружения заземлителя в периоды: максимальной ( $k_1$ ), средней ( $k_2$ ) и наименьшей ( $k_3$ ) влажности грунта, когда давно не было дождя. Эти коэффициенты зависят от климатических зон и учитывают увеличение  $\rho$  в активном (верхнем) слое земли, ориентировочная толщина которого также указана в таблице. Значение  $\rho$  можно не измерять, а принимать при ориентировочных расчетах по ранее приведенным рекомендациям в зависимости от характера грунта, предположив, что он имеет однородную структуру (обычно так рассчитывают заземлители для повторных заземлений

нулевого провода или для производственных объектов и потребительских подстанций с вторичным напряжением 380/220 В). Коэффициент сезонности в этом случае принимают по той же таблице различным для горизонтальных полюс  $k_{сг}$  и для вертикальных стержней  $k_{св}$ .

Рассмотрим пример. Проектируемый вертикальный стержневой заземлитель для здания длиной 2,5 м с заложением вершины на глубину 0,7 м располагается в однородном глинистом грунте в районе, который относится к IV климатической зоне.

По приведенным ранее рекомендациям для глины  $\rho = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , а из таблицы 1.9 получим среднее значение  $k_{св}=1,3$ . Тогда расчетное значение удельного сопротивления грунта будет равно  $\rho_p = k_{св}\cdot\rho = 1,3\cdot 50 = 65 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Таблица 1.9 – Значения коэффициентов сезонности в различных климатических зонах

№ зоны	Характеристики и примеры климатических зон					
	Средняя многолетняя температура, °С		Среднее годовое количество осадков, см	Продолжительность стояния льда, дни	Минимальная толщина активного слоя, м, $h$	Примеры зон (область, край)
	Январь	Июль				
I	-20...-15	15...18	40	170...190	2,2	Кировская
II	-15,2...-10	18...22	50	150	2,0	Ленинградская, Московская
III	-10...0	22...24	50	100	1,8	Курская, Ростовская
IV	0...5	24...25	30...50	0	1,6	Краснодарский
№ зоны	Коэффициент сезонности			При расчете табличным методом для элементов		
	Влажность во время измерения			Горизонтальных при глубине $t_0 = 0,8 \text{ м}$ , $k_{сг}$	Вертикальных с глубиной вершины $t_0$ , м, и длиной $l_в$ , м, $k_{св}$	
	Повышенная	Нормальная	Малая		$l_в = 2...3$ , $t = 0,5...0,8$	$l_в = 5$ , $t = 0,7...0,8$
I	7,0	4,0	2,7	4,5...7,0	1,8...2,0	1,35
II	5,0	2,7	1,9	3,5...4,5	1,6...1,8	1,25
III	3,0	2,0	1,5	2,0...2,5	1,4...1,6	1,15
IV	2,5	1,4	1,1	1,5...2,0	1,2...1,4	1,1

Примечания:

1. Земля считается повышенной влажности, если измерению ее сопротивления предшествовало выпадение большого количества (свыше нормы) осадков (дождей); нормальной (средней) влажности – если измерению предшествовало выпадение небольшого количества (близкое к норме) осадков; малой влажности – если земля сухая, количество осадков в предшествующий измерению период было ниже нормы.

2. Заглубление электродов, т.е. расстояние от поверхности земли до горизонтального электрода и верхнего конца вертикального электрода, равно 0,7–0,8 м.

Значения коэффициентов сезонности, а значит, и удельных сопротивлений  $\rho_{pг}$ ,  $\rho_{pв}$  различны, потому что горизонтальные элементы лежат целиком в активном слое, а вертикальные той или иной частью находятся ниже. Получается, что и при однородной структуре земли она при расчетах фактически рассматривается как двухслойная. Однако, когда определяют допустимое сопротивление заземляющего устройства, состоящего из горизонтальных и вертикальных элементов, приходится использовать в качестве  $\rho_p$  одно эквивалентное удельное сопротивление  $\rho_{э}$ , т.е. удельное сопротивление однородной земли, в которой заземлитель имеет такое же сопротивление, как в фактически неоднородной земле. Это удельное сопротивление имеет значение, лежащее между  $\rho_{pг}$  и  $\rho_{pв}$ . Его находят по методикам, учитывающим конструкцию и намечаемые размеры элементов заземляющего устройства, а также толщину активного слоя. Здесь их не приводим. При ориентировочных расчетах, в которых используются приведенные выше значения  $\rho$  в зависимости от характера грунта и приблизительные значения коэффициентов сезона из таблицы 1.9, можно принимать в качестве эквивалентного значения удельные сопротивления для тех элементов, суммарная длина которых преобладает в данной конструкции заземлителя, возможно с некоторым корректированием в сторону усреднения. Для заземляющего устройства подстанции это может быть  $\rho_{pг}$ , а для заземлителя опоры ВЛ в виде ряда вертикальных элементов  $\rho_{pв}$ .

Сопротивление одного электрода в виде круглого стержня, заглубленного вертикально вровень с землей,

$$R_{\epsilon} = \frac{\rho_{\epsilon}}{2\pi l_{\epsilon}} \ln \frac{4l_{\epsilon}}{d} = 0,336 \frac{\rho_{pв}}{l_{\epsilon}} \lg \frac{4l_{\epsilon}}{d},$$

где  $\rho_{pв}$  расчетное удельное сопротивление грунта для вертикальных элементов,  $l_{\epsilon}$  и  $d$  соответственно длина и диаметр стержня.

По этой же формуле можно определить сопротивление растеканию от стержня из стали с угловым профилем, принимая  $d \approx 0,95 \cdot B$ , где  $B$  ширина

полки уголка. Для стержня, у которого верхний конец находится на глубине до 0,8 м, сопротивление

$$R_g = 0,336 \frac{\rho_g}{l_g} \left( \lg \frac{2l_g}{d} + 0,5 \frac{4t + 3l_g}{4t + l_g} \right),$$

где  $t$  расстояние от поверхности земли до вершины стержня.

Сопротивление заземления горизонтальной полосы длиной  $l_z$  и шириной  $b$ , положенной на ребро на глубине  $t$  от поверхности земли,

$$R_z = \frac{\rho_{pz}}{2\pi l_g} \ln \frac{2l_z^2}{bt} = 0,336 \frac{\rho_{pz}}{l_g} \lg \frac{2l_z^2}{bt},$$

где  $\rho_{pz}$  расчетное удельное сопротивление для горизонтальных элементов.

Эту же формулу используют при расчете прямого горизонтального заземлителя из круглого стального стержня диаметром  $d_z$ , подставляя  $b = 2d_z$ .

Для заземлителя в виде горизонтальной сетки или сетки с вертикальными электродами по периметру применима формула

$$R_c = 0,44 \frac{\rho_p}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_p}{L},$$

где  $S$  – площадь, занятая заземлителем, а  $L$  – общая длина проводников заземлителя, включая длины вертикальных элементов и выравнивающих полос.

### 1.7.2.3 Групповые заземлители

По условиям безопасности обслуживающего персонала у заземления должно быть сравнительно малое сопротивление, обеспечить которое можно путем увеличения геометрических размеров одиночного заземлителя (электрода) или применения нескольких параллельно соединенных электродов – группового заземлителя. Используя так заземлитель, можно выровнять потенциал на территории, где размещаются заземляющие электроды, что в ряде случаев играет решающую роль в обеспечении безопасности обслуживающего персонала.

### 1.7.2.3.1 Расчет группового заземлителя

При бесконечно больших расстояниях между электродами группового заземлителя (обычно более 40 м) поля растекания токов вокруг них практически не взаимодействуют. В этом случае потенциальные кривые от каждого электрода, например, 1, 2, 3, взаимно не пересекаются. При этом потенциалы электродов равны независимо от их размеров. Однако в этом случае токи, протекающие через них, и потенциалы различны по величине и форме, рисунок 1.40.

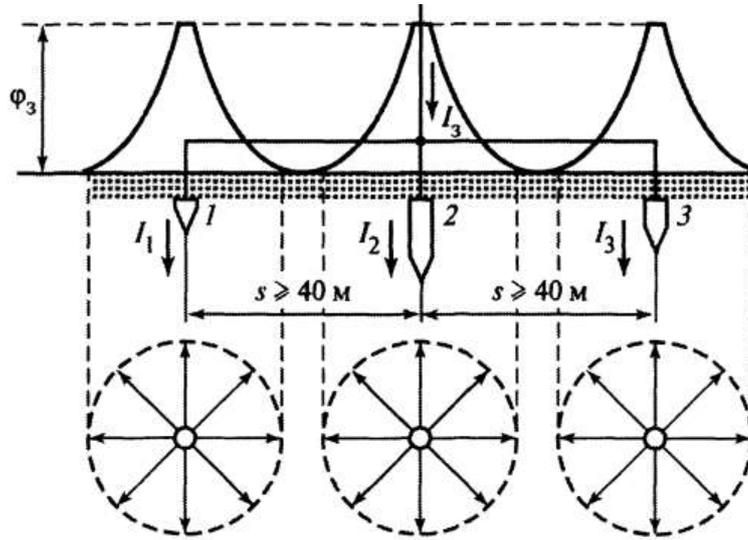


Рисунок 1.40 – Потенциальные кривые и поля растекания тока группового заземлителя при расстояниях между электродами  $s \geq 40$

При малых расстояниях между электродами группового заземлителя (менее 40 м) поля растекания токов накладываются одно на другое, в результате потенциальные кривые взаимно пересекаются и, складываясь, образуют суммарную потенциальную кривую группового заземлителя.

В результате поверхность земли на участках между электродами приобретает некоторый потенциал. При этом форма суммарной потенциальной кривой зависит от расстояния между электродами, их взаимного расположения, числа, формы и размеров. Потенциальная кривая простейшего группового заземлителя, состоящего из двух одинаковых полушаровых электродов, показана на рисунок 1.41 утолщенной линией. Она получена сложением потенциальных кривых обоих электродов. Поскольку электроды одинаковы и

находятся в одинаковых условиях, ток, стекающий в землю, распределяется между ними поровну, и, следовательно, их потенциальные кривые идентичны. Рассмотрим участок между электродами, т.е. кривые  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , которые в системе прямоугольных координат  $\varphi, x$  с ординатой, проходящей через центр левой полусферы, выражаются следующими уравнениями:

$$\varphi_1 = \frac{\varphi_0 r}{x}, \quad (1.20)$$

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_0 r}{s - x}, \quad (1.21)$$

где  $\varphi_0$  – собственный потенциал полусферы, В;  $r$  – радиус полусферы, м;  $s$  – расстояние между центрами полусфер, м. Искомое уравнение суммарной потенциальной кривой  $\varphi, В$ , на участке между заземлителями определяется суммированием уравнений (1.20) и (1.21):

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{\varphi_0 r s}{x(s - x)}.$$

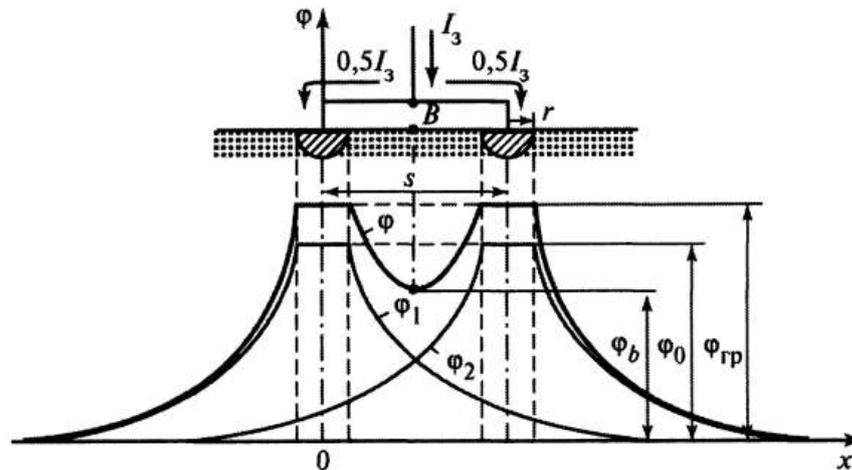


Рисунок 1.41 – Потенциальная кривая группового заземлителя, состоящего из двух одинаковых полусферовых электродов

Поскольку электроды группового заземлителя связаны между собой электрически, они имеют одинаковый потенциал, являющийся потенциалом группового заземлителя  $\varphi_{гр}$ . Следовательно, потенциал каждого электрода группового заземлителя состоит из собственного потенциала, обусловленного стеканием через него тока, и потенциалов, наведенных другими электродами:

$$\varphi_{\text{гр}} = \varphi_{01} + \sum_2^n \varphi_n, \quad (1.22)$$

где  $\varphi_{01} = I_1 R_1$  – собственный потенциал первого электрода, В;  $I_1$  – ток, стекающий через этот электрод в землю, А;  $R_1$  – сопротивление его растеканию, Ом;  $n$  – количество электродов в групповом заземлителе;  $\varphi_n$  – потенциал, наведенный на первом электроде одним из соседних, В, который определяется из уравнения потенциальной кривой этого соседнего электрода с учетом расстояния между электродами. Например, если потенциал наводится полушаровым электродом радиусом  $r$ , то его величина на другом электроде любой формы описывается уравнением (1.20):

$$\varphi_n = \frac{\varphi_0 r}{x},$$

где  $\varphi_0$  – собственный потенциал полушара, В;  $x$  – ближайшее расстояние от центра полушара до поверхности электрода, на котором определяется  $\varphi_n$ , м.

В случае, показанном на рисунке 1.41, один полушаровой заземлитель наводит на другом потенциал

$$\varphi_n = \frac{\varphi_0 r}{s - r}.$$

В общем случае собственные потенциалы электродов не равны, как не равны и потенциалы, наводимые другими электродами. Однако сумма собственного и всех наведенных на электроде потенциалов для всех электродов одинакова и равна  $\varphi_{\text{гр}}$ . Иначе говоря, каждый электрод, входящий в состав группового заземлителя, имеет потенциал, равный потенциалу группового заземлителя  $\varphi_{\text{гр}}$  (рисунок 1.42). Если групповой заземлитель состоит из одинаковых электродов, размещенных по вершинам правильного многоугольника, то у электродов одинаковыми оказываются токи, стекающие через них в землю, а, следовательно, и собственные потенциалы  $\varphi_0$ , и сумма наведенных на каждом из них потенциалов  $\sum_{n-1} \varphi_n$ . В этом случае уравнение

(1.22) может быть записано в виде

$$\varphi_{\text{гр}} = \varphi_0 + \sum_{n=1} \varphi_n. \quad (1.23)$$

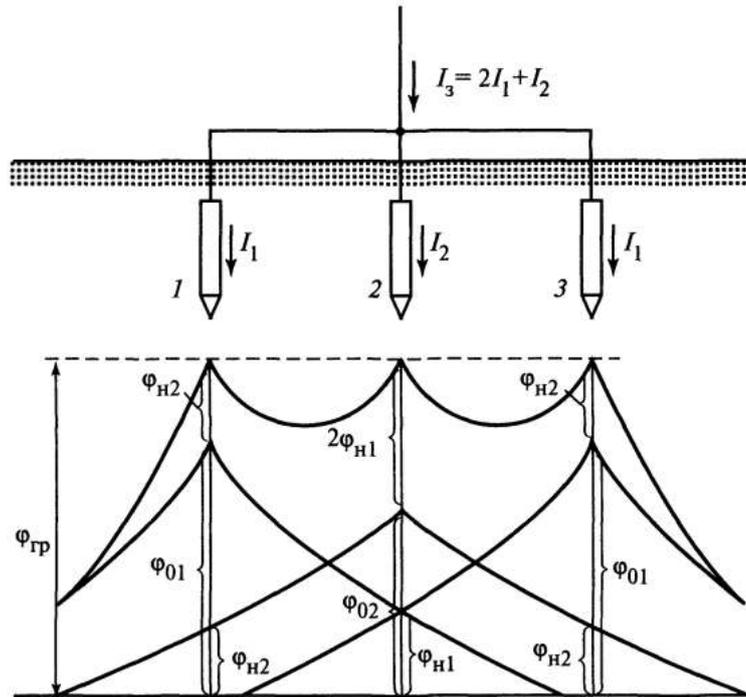


Рисунок 1.42 – Потенциальная кривая группового заземлителя, состоящего из трех одинаковых электродов (1, 2, 3), размещенных на одной прямой:  $\varphi_{01}$ ,  $\varphi_{02}$  – собственные потенциалы электродов;  $\varphi_{\text{н}1}$ ,  $\varphi_{\text{н}2}$  – потенциалы, наведенные другими электродами

Если одинаковые электроды группового заземлителя расположены на одинаковых расстояниях один от другого, что возможно только при двух электродах или трех, размещенных в вершинах равностороннего треугольника, то у них оказываются одинаковыми не только собственные потенциалы  $\varphi_0$ , но и потенциалы, наводимые каждым на каждом. Для этих частных случаев уравнение (1.22) принимает вид

$$\varphi_{\text{гр}} = \varphi_0 + (n - 1)\varphi_n,$$

где  $n$  – количество электродов (2 или 3).

При бесконечно больших расстояниях между электродами (больше 40 м) каждый из них находится вне полей растекания тока с других электродов (см. рисунок 1.40). Поэтому наведенные потенциалы на электродах отсутствуют, а потенциал группового заземлителя, который в этом случае часто обозначается  $\varphi_{\infty}$ , имеет наименьшее значение, равное значению собственного

потенциала электрода, входящего в состав группового заземлителя:

$$\varphi_{\infty} = \varphi_{01} = \varphi_{02} = \dots = \varphi_{0n}$$

или

$$\varphi_{\infty} = I_1 R_1 = I_2 R_2 = \dots = I_n R_n,$$

где  $I_1, I_2, \dots, I_n$  – токи, стекающие через электроды, А;  $R_1, R_2, \dots, R_n$  – сопротивления растеканию токов, Ом. Если при этом электроды одинаковы, то и токи, стекающие через них в землю, одинаковы, т.е.

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n.$$

Следовательно, потенциал группового заземлителя, В:

$$\varphi_{\infty} = \frac{I_3 R_0}{n},$$

где  $R_0$  – сопротивление растеканию единичного электрода, Ом;  $I_3$  – ток, стекающий через групповой заземлитель, А.

При очень больших расстояниях между электродами группового заземлителя (более 40 м) сопротивление всей группы заземляющих электродов  $R_{\infty}$ , Ом, описывается равенством

$$R_{\infty} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{1}{R_0}}.$$

Если электроды одинаковы, а следовательно, одинаковы и их сопротивления растеканию  $R_0$ , то сопротивление группового заземлителя, Ом, будет равно  $R_{\infty} = R_0/n$ .

При расстояниях между электродами меньше 40 м происходит взаимодействие полей растекания тока, в результате чего на общих участках земли, по которым проходят токи, стекающие с нескольких электродов, увеличивается плотность тока, и, следовательно, на этих участках возрастает падение напряжения. Это явление, равноценное уменьшению сечения земли, по которому проходит ток от заземлителя, приводит к увеличению сопротивления растеканию как отдельных электродов, составляющих групповой заземлитель, так и заземлителя в целом. Иначе говоря, при уменьшении расстояния между

электродами до 40 м и менее сопротивление группового заземлителя увеличивается, а проводимость соответственно уменьшается, что может быть представлено следующими соотношениями:

$$R_{\text{гр}} = \frac{R_{\infty}}{\eta}; \frac{1}{R_{\text{гр}}} = \eta \frac{1}{R_{\infty}},$$

где  $R_{\text{гр}}$  – действительное значение сопротивления растеканию группового заземлителя при данном размещении его электродов, Ом;  $R_{\infty}$  – наименьшее значение сопротивления растеканию тока группового заземлителя, т.е. при расстояниях между его электродами более 40 м, Ом;  $\eta$  – коэффициент, характеризующий уменьшение проводимости заземлителей и называемый коэффициентом использования проводимости группового заземлителя или просто коэффициентом использования. Иногда  $\eta$  именуется коэффициентом экранирования. Таким образом, сопротивление группового заземлителя, Ом, в общем случае описывается уравнением

$$R_{\infty} = \frac{1}{\eta \sum_1^n \frac{1}{R_0}}.$$

При равенстве сопротивлений всех электродов уравнение примет вид  $R_{\text{гр}} = R_0/\eta n$ .

Коэффициент использования группового заземлителя, или просто коэффициент использования, есть отношение действительной проводимости группового заземлителя  $1/R_{\text{гр}}$  к наибольшей возможной его проводимости  $1/R_{\infty}$ , т.е. при бесконечно больших расстояниях между его электродами:

$$\eta = \frac{R_{\infty}}{R_0}.$$

Коэффициент  $\eta$  может быть выражен отношением соответствующих потенциалов группового заземлителя:

$$\eta = \frac{I_3 R_{\infty}}{I_3 R_{\text{гр}}} = \frac{\varphi_{\infty}}{\varphi_0}$$

или с учетом (1.23) и (1.22):

$$\eta = \frac{\varphi_{01}}{\varphi_{01} + \sum_2^n \varphi_{\text{H}}}$$

Для частного случая, когда групповой заземлитель состоит из одинаковых электродов, размещенных по вершинам правильного многоугольника, последнее уравнение имеет вид

$$\eta = \frac{\varphi_0}{\varphi_0 + \sum_{n-1} \varphi_{\text{H}}}$$

Значение коэффициента использования зависит от формы, размеров и размещения электродов, составляющих групповой заземлитель, а также от их количества  $n$  и расстояния  $s$  между соседними электродами. Так, с увеличением  $s$  уменьшается взаимодействие полей единичных заземлителей, в результате чего  $\eta$  возрастает; при  $s \geq 40$  м проводимость заземлителей используется полностью и  $\eta = 1$ . С увеличением количества заземляющих электродов (при неизменном значении  $s$ ) повышается взаимодействие полей и, следовательно, снижается  $\eta$ . Для защитного заземления обычно применяют электроды двух типов – стержневые, забиваемые в землю вертикально, и полосовые, укладываемые в грунт горизонтально, с помощью которых соединяют вертикальные электроды. В отдельных случаях горизонтальные электроды используют как самостоятельные заземлители, т.е. без вертикальных электродов. При использовании вертикальных и горизонтальных заземлителей возникает взаимодействие полей растекания тока вертикальных электродов не только между собой, но и с полями горизонтальных электродов. Однако степень этого взаимодействия различна и учитывается двумя коэффициентами использования – вертикальных  $\eta_{\text{в}}$  и горизонтальных  $\eta_{\text{г}}$  электродов.

Сопротивление группового заземлителя, Ом, определяется из равенства

$$R_{\text{гп}} = \frac{R_{\text{в}} R_{\text{г}}}{R_{\text{в}} \eta_{\text{г}} + R_{\text{г}} n \eta_{\text{в}}}$$

### 1.7.2.3 Задачи для решения

**Задача 1.** Ток  $I_3 = 60$  А стекает в землю через групповой заземлитель,

состоящий из трех соединенных между собой одинаковых стержневых электродов диаметром  $d = 0,05$  м, рисунок 1.43. Стержни забиты в землю на глубину  $L = 2$  м и размещены в вершинах равностороннего треугольника, земля однородная, ее удельное сопротивление  $\rho = 100$  Ом·м.

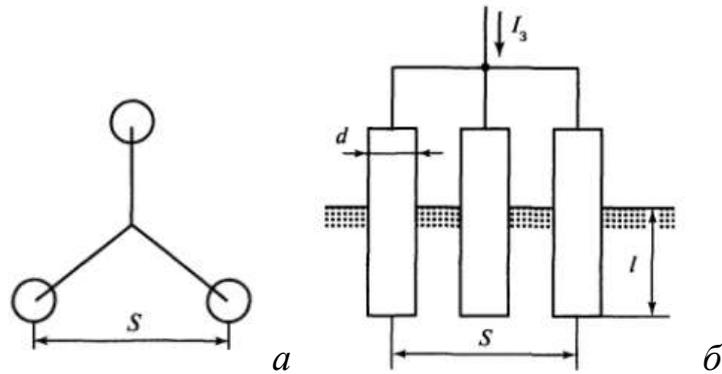


Рисунок 1.43 – Групповой заземлитель, состоящий из трех стержневых вертикальных электродов, размещенных в вершинах равностороннего треугольника: *a* – вид сверху; *б* – вид сбоку

Требуется определить потенциал группового заземлителя  $\varphi_{гр}$  и коэффициент использования его проводимости  $\eta$  для двух случаев: при расстоянии между центрами электродов  $s = 2$  и  $10$  м.

**Задача 2.** Два одинаковых стержневых заземлителя (электрода) круглого сечения забиты в землю вертикально на всю их длину. Расстояние между их центрами  $s = 5$  м. Электроды соединены между собой проводником, с каждого из них в землю стекает ток  $I_3 = 5$  А. Длины электродов  $l = 5$  м; диаметры электродов  $d = 0,05$  м; земля однородная, ее удельное сопротивление  $\rho = 100$  Ом·м; длина шага человека  $a = 0,8$  м,  $\eta$  принять равным  $0.85$ . Требуется определить потенциалы электродов, их сопротивления стеканию тока, а также максимальные значения напряжений прикосновения и шага для человека, находящегося между электродами на прямой, соединяющей их центры. Вычисление произвести, полагая, что сопротивление стеканию тока с ног человека и сопротивление его обуви равны нулю; в итоге изобразить схему размещения электродов, потенциальные кривые и буквенные обозначения величин.

**Задача 3.** Ток  $I_3$ , равный 30 А, стекает с группового заземлителя, состоящего из трех одинаковых полушаровых электродов радиусом  $r = 0,5$  м, размещенных в вершинах равностороннего треугольника (рисунок 1.44). Требуется определить  $\varphi_{ep}$  при расстояниях между центрами электродов  $s$ , равных 2,5; 10; 40 м; удельное сопротивление земли  $\rho = 120$  Ом·м (земля однородная).

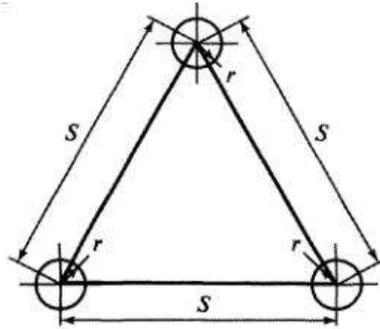


Рисунок 1.44 – Групповой заземлитель из трех полушаровых электродов, размещенных в вершинах равностороннего треугольника на поверхности земли

**Задача 4.** Два полушаровых заземлителя (электрода) расположены на расстоянии друг от друга (расстоянии между их центрами)  $S = 5$  м. Они соединены между собой проводником, и с каждого из них стекает ток  $I = 5$  А. Радиусы полушаров  $r = 0,05$  м, земля однородная, ее удельное сопротивление  $\rho = 50$  Ом·м; длина шага человека  $a = 0,8$  м. Требуется определить потенциалы электродов, их сопротивления стеканию тока, а также максимальные значения напряжений прикосновения и шага для человека, находящегося между полушарами на прямой, соединяющей их центры. (Вычисление произвести, полагая, что сопротивление стеканию тока с ног человека и сопротивление его обуви равны нулю.) В результате изобразить схему размещения электродов, потенциальные кривые и буквенные обозначения величин.

**Задача 5.** Вычислить коэффициент использования и сопротивление группового заземлителя, состоящего из четырех полушаровых электродов, расположенных в вершинах квадрата со стороной  $a = 3$  м (рисунок 1.45). Радиус электродов  $r = 0,5$  м, земля однородная с удельным сопротивлением

$\rho = 157 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

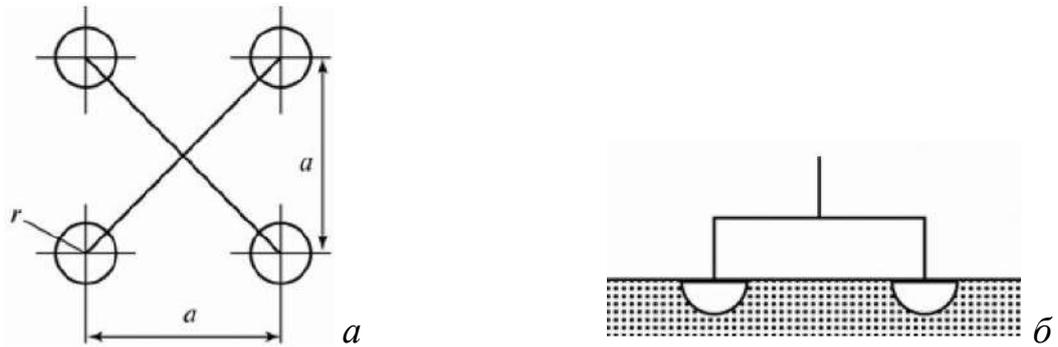


Рисунок 1.45 – Групповой заземлитель, состоящий из четырех полушаровых электродов, размещенных по вершинам квадрата:  $a$  – вид сверху;  $b$  – вид сбоку

**Задача 6.** Определить потенциал  $\varphi_{\text{гр}}$ , сопротивление  $R_{\text{гр}}$  и коэффициент использования проводимости  $\eta$  группового заземлителя, состоящего из четырех полушаровых электродов одинакового размера, расположенных на прямой линии. Электроды соединены между собой проводником, размещенным над землей, рисунок 1.46. Радиус каждого полушарового электрода принять  $r = 0,05 \text{ м}$ , расстояние между соседними электродами  $a = 1 \text{ м}$ ,  $b = 25 \text{ м}$ , земля однородная с удельным сопротивлением  $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Показания амперметра  $I = 5 \text{ А}$ .

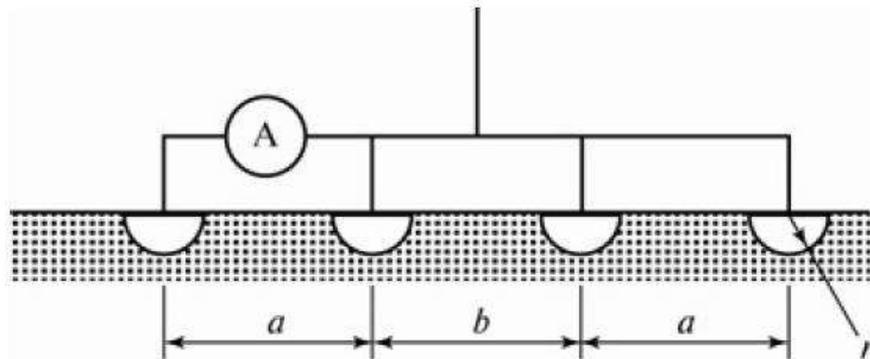


Рисунок 1.46 – Групповой заземлитель, состоящий из четырех полушаровых электродов

#### 1.7.2.4 Численный расчет растекания токов с группового заземлителя

Цель работы – расчет сопротивления заземления группового заземлителя, состоящего из трех металлических стержней.

Работа выполняется в студенческой версии системы ELCUT.

Необходимо оценить величину стекающего тока с заземлителя, состоящего

из 1, 2 и 3 металлических стержней. После чего оценить влияние симметрии расположения стержней на величину стекающего тока. Исследуемый заземлитель приведен на рисунке 1.47. Все размеры указаны в сантиметрах. Удельное сопротивление грунта 10 Ом·м, потенциал приложенный к стержням равен 250 В. Тип задачи – электрическое поле постоянных токов, класс модели – плоская ( $L_z=100$  см), координаты – декартовы.



Рисунок 1.47 – Групповой заземлитель, состоящий из трех горизонтально расположенных стержней

При создании удаленной границы использовать инструмент «половина круга». Граничным условием будет являться равенство нулю потенциала на ней. Для вычисления тока стекающих со стержней необходимо построить контур вокруг них.

### 1.7.3 Защитное заземление

Защитное заземление, т.е. заземление, выполняемое в целях электробезопасности, это преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам (индуктивное влияние соседних токоведущих частей, вынос потенциала, разряд молнии и т.п.). Эквивалентом земли может быть вода реки или моря, каменный уголь в карьерном залегании и т.п.

Назначение защитного заземления – устранение опасности поражения током в случае прикосновения к корпусу электроустановки и другим нетоковедущим металлическим частям, оказавшимся под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам. Защитное заземление следует отличать от рабочего заземления и заземления молниезащиты.

Рабочее заземление – преднамеренное соединение с землей отдельных точек электрической цепи, например, нейтральных точек обмоток генераторов, силовых и измерительных трансформаторов, дугогасящих аппаратов, реакторов поперечной компенсации в дальних линиях электропередачи, а также фазы при использовании земли в качестве фазного или обратного провода. Рабочее заземление предназначено для обеспечения надлежащей работы электроустановки в нормальных или аварийных условиях и осуществляется непосредственно (т.е. путем соединения проводником заземляемых частей с заземлителем) или через специальные аппараты – пробивные предохранители, разрядники, резисторы и т.п. Согласно ПУЭ, рабочее (функциональное) заземление – это заземление точки или точек токоведущих частей электроустановки, выполняемое для обеспечения работы электроустановки не в целях электробезопасности.

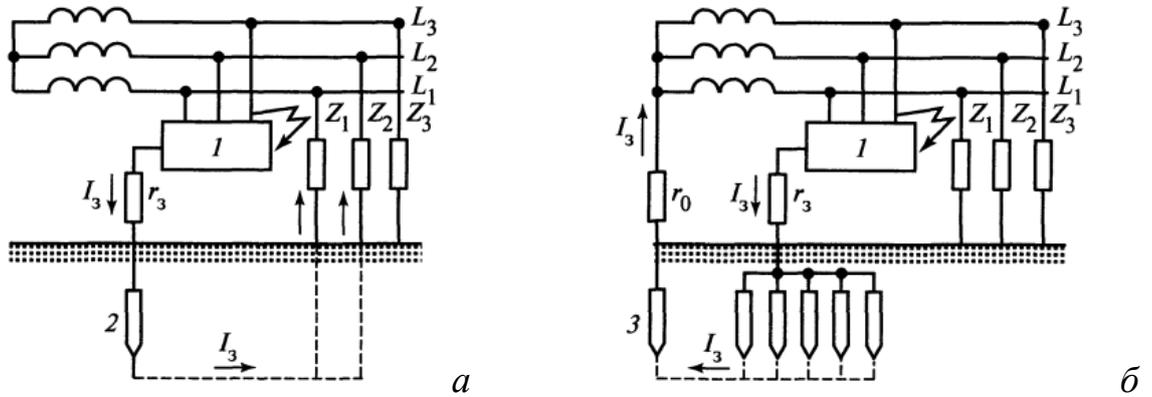
Заземление молниезащиты – преднамеренное соединение с землей молниеприемников и разрядников в целях отвода от них токов молнии в землю.

Принцип действия защитного заземления – снижение до безопасных значений напряжений прикосновения и шага, обусловленных замыканием на корпус и другими причинами. Это достигается путем уменьшения потенциала заземленного оборудования (уменьшением сопротивления заземлителя), а также путем выравнивания потенциалов основания, на котором стоит человек, и заземленного оборудования (подъемом потенциала основания, на котором стоит человек, до значения, близкого к значению потенциала заземленного оборудования).

Области применения защитного заземления:

- сети напряжением до 1000 В переменного тока: трехфазные трехпроводные с изолированной нейтралью; однофазные двухпроводные, изолированные от земли, а также постоянного тока двухпроводные с изолированной средней точкой обмоток источника тока;

- сети напряжением выше 1000 В переменного и постоянного тока с любым режимом нейтральной или средней точки обмоток источников тока (рисунок 1.48).

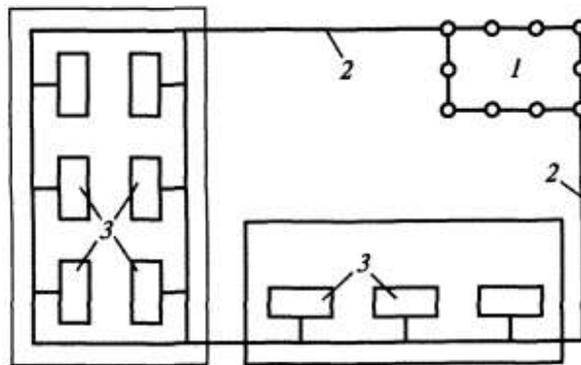


1 – заземленное оборудование; 2 – заземлитель защитного заземления; 3 – заземлитель рабочего заземления;  $r_0$ ,  $r_3$  – сопротивления рабочего и защитного заземлений

Рисунок 1.48 – Принципиальные схемы защитного заземления в сетях трехфазного тока в сети с изолированной нейтралью до (а) и выше (б) 1000 В

В зависимости от места размещения заземлителя относительно заземляемого оборудования различают два типа заземляющих устройств: выносное и контурное. Выносное заземляющее устройство (рисунок 1.49) характеризуется тем, что его заземлитель вынесен за пределы площадки, на которой размещено заземляемое оборудование, или сосредоточен на некоторой части этой площадки. Поэтому выносное заземляющее устройство называют также сосредоточенным. Существенный недостаток выносного заземляющего устройства – отдаленность заземлителя от защищаемого оборудования, вследствие чего на всей или на части защищаемой территории коэффициент прикосновения  $\alpha_1 = 1$ . Поэтому заземляющие устройства этого типа применяются лишь при малых токах замыкания на землю, в частности, в установках до 1000 В, где потенциал заземлителя не превышает значения допустимого напряжения прикосновения  $U_{\text{пр.доп}}$  (с учетом коэффициента напряжения прикосновения  $\alpha_2$ , учитывающего падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек):

$$\varphi_3 = I_3 r_3 \leq \frac{U_{\text{пр.доп}}}{\alpha_2}.$$



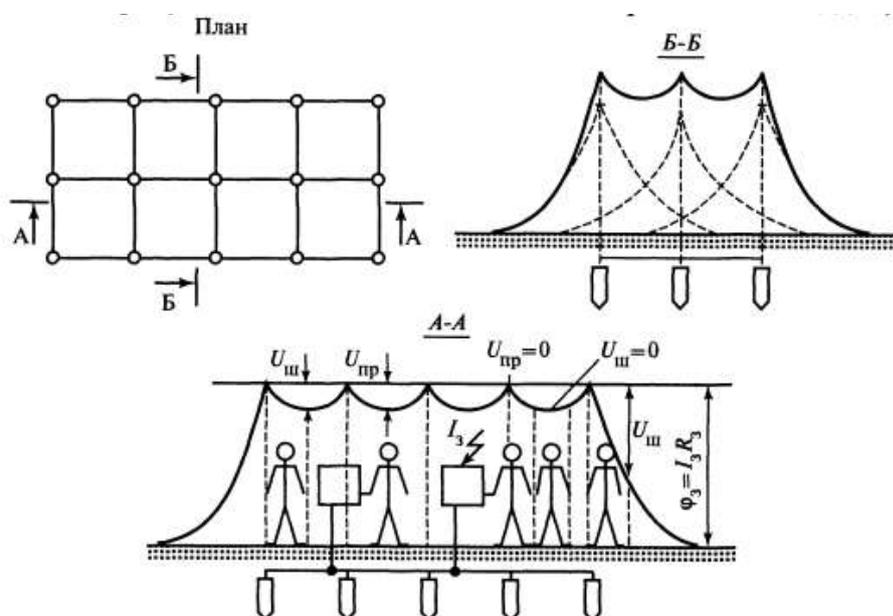
1 – заземлитель; 2 – заземляющие проводники; 3 – заземляемое оборудование

Рисунок 1.49 – Выносное заземляющее устройство

Кроме того, при большом расстоянии до заземлителя может значительно возрасти сопротивление заземляющего устройства в целом за счет сопротивления соединительного, т.е. заземляющего, проводника. Достоинством выносного заземляющего устройства является возможность выбора места размещения электродов заземлителя с наименьшим сопротивлением грунта (сырое, глинистое, в низинах и т.п.). Необходимость в устройстве выносного заземления может возникнуть при невозможности по каким-либо причинам разместить заземлитель на защищаемой территории; при высоком сопротивлении земли на данной территории (например, песчаный или скалистый грунт) и наличии вне этой территории мест со значительно лучшей проводимостью земли; при рассредоточенном расположении заземляемого оборудования (например, в горных выработках) и т.п.

Контурное заземляющее устройство характеризуется тем, что электроды его заземлителя размещаются по контуру (периметру) площадки, на которой находится заземляемое оборудование, а также внутри этой площадки. Часто электроды распределяются на площадке по возможности равномерно, поэтому контурное заземляющее устройство называется также распределенным. Безопасность при распределенном заземляющем устройстве может быть обеспечена не только уменьшением потенциала заземлителя, но и выравниванием потенциала на защищаемой территории до такого значения,

чтобы максимальные напряжения прикосновения и шага не превышали допустимых. Это достигается путем соответствующего размещения одиночных заземлителей на защищаемой территории. В качестве примера на рисунке 1.50 показано распределение потенциала в момент замыкания фазы на заземленный корпус на открытой распределительной подстанции, имеющей контурное заземление. Как видно из рисунка, изменение потенциала в пределах площадки, на которой размещены электроды заземлителя, происходит плавно; при этом напряжение прикосновения  $U_{пр}$ , и напряжение шага  $U_{ш}$  имеют небольшие значения по сравнению с потенциалом заземлителя  $\varphi_3$ . Однако за пределами контура по его краям наблюдается крутой спад  $\varphi$ .



$U_{пр}$ ,  $U_{ш}$  – напряжения прикосновения и шага;  $\varphi_3$  – потенциал заземлителя;  $I_3$  – ток, стекающий в землю через заземлитель;  $R_3$  – сопротивление заземлителя растеканию тока

Рисунок 1.50 – Контурное заземляющее устройство

Различают заземлители искусственные, предназначенные исключительно для целей заземления, и естественные – находящиеся в земле металлические предметы иного назначения. Для искусственных заземлителей применяют обычно вертикальные и горизонтальные электроды.

В качестве вертикальных электродов часто используют стальные трубы диаметром 5–6 см с толщиной стенки не менее 3,5 мм и угловую сталь с толщиной полок не менее 4 мм (обычно это угловая сталь размером от 40×40 до

60×60 мм) отрезками длиной 2,5–3,0 м. Широкое применение находит также прутковая сталь диаметром не менее 10 мм, длиной до 10 м и более.

Для связи вертикальных электродов и в качестве самостоятельного горизонтального электрода применяют полосовую сталь сечением не менее 4×12 мм и сталь круглого сечения диаметром не менее 6 мм. Размещение электродов выполняют в соответствии с проектом. Заземлители не следует размещать вблизи горячих трубопроводов и других объектов, вызывающих высыхание почвы, а также в местах, где возможна пропитка грунта нефтью, маслами и т.п., поскольку в таких местах сопротивление грунта резко возрастает. В случае опасности усиленной коррозии заземлителей необходимо применять электроды увеличенного сечения либо оцинкованные или омедненные. В некоторых (довольно редких) случаях целесообразно выполнить электрическую защиту заземлителей от коррозии.

Для установки вертикальных заземлителей предварительно роют траншею глубиной 0,7–0,8 м, затем трубы или уголки заглубляют копрами, гидропрессами и т.п. (рисунок 1.51). Стальные стержни диаметром 10–12 мм длиной 4,0–4,5 м ввертывают в землю с помощью специальных приспособлений, а более длинные заглубляют вибраторами. Верхние концы погруженных в землю вертикальных электродов соединяют стальной полосой с помощью сварки. При этом полосу устанавливают на ребро, поскольку в таком положении ее удобнее приварить к вертикальным электродам.

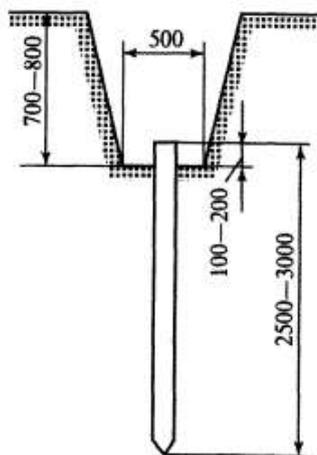


Рисунок 1.51 – Установка стержневого электрода в траншее

В качестве естественных заземлителей могут использоваться проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубы (за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывоопасных газов); обсадные трубы артезианских колодцев, скважин, шурфов и т.п.; металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, имеющие соединения с землей; свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле; металлические шпунты гидротехнических сооружений и т.п.

В качестве естественных заземлителей подстанций и распределительных устройств (РУ) рекомендуется использовать заземлители опор отходящих воздушных линий электропередачи, соединенные с помощью грозозащитных тросов линий с заземляющим устройством подстанции или РУ.

К оборудованию заземляющие проводники присоединяют сваркой или болтами, а к металлоконструкциям и заземлителю (под землей) сваркой внахлестку на длине, равной двойной ширине для полос или шести диаметрам для круглых стержней. К трубопроводам, используемым в качестве естественного заземлителя, заземляющие проводники можно присоединять с помощью хомутов, если контактная поверхность хомута облужена, а труба в месте его наложения зачищена.

Расчет защитного заземления имеет целью определить основные параметры заземления – количество, размеры и порядок размещения одиночных заземлителей и заземляющих проводников, при которых напряжения прикосновения и шага в период замыкания фазы на заземленный корпус не превышают допустимых значений. При этом расчет производится обычно для случаев размещения заземлителя в однородной земле. В последние годы разработаны и начали применяться инженерные способы расчета заземлителей в многослойном грунте.

При расчете заземлителей в однородной земле учитывается сопротивление верхнего слоя земли (слоя сезонных изменений), обусловленное промерзанием или высыханием грунта. Расчет производят способом, основанным на применении коэффициентов использования проводимости заземлителя и

называемым поэтому способом коэффициентов использования. Его выполняют как при простых, так и при сложных конструкциях групповых заземлителей.

При расчете заземлителей в многослойной земле обычно принимают двухслойную модель земли с удельными сопротивлениями верхнего и нижнего слоев  $\rho_1$  и  $\rho_2$  соответственно и толщиной (мощностью) верхнего слоя  $h_1$ . Расчет производится способом, основанным на учете потенциалов, наведенных на электроды, входящие в состав группового заземлителя, и называемым поэтому способом наведенных потенциалов. Расчет заземлителей в многослойной земле более трудоемкий, но дает более точные результаты. Его целесообразно применять при сложных конструкциях групповых заземлителей, которые обычно имеют место в электроустановках с эффективно заземленной нейтралью, т. е. в установках напряжением 110 кВ и выше.

Для расчета заземления необходимы следующие сведения:

- характеристика электроустановки – тип установки, виды основного оборудования, рабочие напряжения, способы заземления нейтралей трансформаторов и генераторов и т.п.;
- план электроустановки с указанием основных размеров и размещения оборудования;
- формы и размеры электродов, из которых предусмотрено соорудить проектируемый групповой заземлитель, а также предполагаемая глубина погружения их в землю;
- данные измерений удельного сопротивления грунта на участке, где должен быть сооружен заземлитель, и сведения о погодных (климатических) условиях, при которых проводились эти измерения, а также характеристика климатической зоны. Если земля принимается двухслойной, то необходимо иметь данные измерений удельного сопротивления обоих слоев земли и толщины верхнего слоя;
- данные об естественных заземлителях: какие сооружения могут быть использованы для этой цели и каковы сопротивления их растеканию

тока, полученные непосредственным измерением. Если по каким-либо причинам измерить сопротивление естественного заземлителя невозможно, то должны быть представлены сведения, позволяющие определить это сопротивление расчетным путем;

- расчетный ток замыкания на землю. Если ток неизвестен, то его вычисляют обычными способами, при этом следует учитывать указания, приведенные ниже;
- расчетные значения допустимых напряжений прикосновения (и шага) и время действия защиты в случае, если расчет производится по напряжениям прикосновения (и шага).

Определение требуемого сопротивления заземляющего устройства осуществляют по заранее заданным наибольшим допустимым значениям сопротивления заземляющего устройства  $R_{зз}$  или напряжения прикосновения  $U_{пр\cdot доп}$  (и шага  $U_{ш\cdot доп}$ ).

Наибольшие допустимые значения  $R_{зз}$ , установленные «Правилами устройства электроустановок», составляют:

для установок до 1000 В:

- 10 Ом при суммарной мощности генераторов или трансформаторов, питающих данную сеть, не более 100 кВ·А;
- 4 Ом во всех остальных случаях;

для установок выше 1000 В:

- 0,5 Ом при эффективно заземленной нейтрали (т.е. при больших токах замыкания на землю);
- $250/I_3 \leq 10$  Ом при изолированной нейтрали (т.е. при малых токах замыкания на землю) и условии, что заземлитель используется только для электроустановок напряжением выше 1000 В;

Здесь  $I_3$  – расчетный ток замыкания на землю.

При изолированной нейтрали и условии, что заземлитель используется одновременно для установок напряжением до 1000 В, должны быть также

выполнены условия, установленные для этих электроустановок.

Определение требуемого сопротивления искусственного заземлителя. Использование естественных заземлителей предписывается ПУЭ, поскольку позволяет получить значительную экономию средств. Если сопротивление естественного заземлителя  $R_e$  меньше требуемого  $R_з$ , то необходимое значение искусственного заземлителя равно

$$R_{и} = \frac{R_e R_з}{R_e - R_з},$$

где  $R_e$  – сопротивление растеканию естественного заземлителя, Ом.

Сопротивление естественных заземлителей можно вычислять по формулам для искусственных заземлителей аналогичной формы или по специальным формулам, встречающимся в технической литературе. Например, сопротивление растеканию системы грозозащитный трос – опоры  $R_e$ , Ом (при числе опор с тросом более 20), определяют по приближенной формуле

$$R_{и} = \sqrt{\frac{r_{оп} r_T}{n_T}},$$

где  $r_{оп}$  – расчетное, т.е. наибольшее (с учетом сезонных колебаний), сопротивление заземления одной опоры, Ом;  $r_T$  – активное сопротивление троса на длине одного пролета, Ом;  $n_T$  – количество тросов на опоре.

Для стального троса сечением  $s$ , мм<sup>2</sup>, при длине пролета  $l$ , м, активное сопротивление можно определить как

$$r_T = \frac{0,15l}{s}.$$

При расчете заземлителя в однородной земле способом коэффициентов использования его расчетное сопротивление  $R$  определяют в следующем порядке:

- по предварительной схеме заземлителя, нанесенной на план установки, определяют длину горизонтальных и количество  $n$  вертикальных электродов;

- по соответствующим формулам вычисляют расчетные сопротивления горизонтальных электродов (суммарное сопротивление)  $R_{\Gamma}$  и одного вертикального  $R_{\text{в}}$ ;
- находят коэффициенты использования для вертикальных  $\eta_{\text{в}}$  и горизонтальных  $\eta_{\Gamma}$  электродов;
- вычисляют расчетное сопротивление заземлителя  $R$ :

$$R_{\text{и}} = \frac{R_{\text{в}} R_{\Gamma}}{R_{\text{в}} \eta_{\Gamma} + R_{\Gamma} n \eta_{\text{в}}}.$$

При расчете сложного заземлителя в двухслойной земле способом наведенных потенциалов значение  $R$  вычисляют в следующем порядке:

- по предварительной схеме заземлителя (рисунок 1.52а) определяют площадь территории, занимаемой заземлителем (площадь заземлителя),  $S$ , м<sup>2</sup>; суммарную длину горизонтальных электродов  $L_{\Gamma}$ , м; количество  $n$  вертикальных электродов и их суммарную длину:  $L_{\text{в}} = n l_{\text{в}}$ ;
- составляют условную так называемую расчетную модель (рисунок 1.52б), представляющую собой горизонтальную квадратную сетку из взаимно пересекающихся полос с вертикальными электродами. Расчетная модель имеет одинаковые с принятой схемой заземлителя площадь  $S$ ; суммарную длину горизонтальных и вертикальных электродов и их количество  $L_{\Gamma}$ ,  $n$ ,  $l_{\text{в}}$ ,  $L_{\text{в}}$ ; глубину залегания в земле  $t_{\text{в}}$ , м, при погружении в однородную землю с расчетным эквивалентным удельным сопротивлением  $\rho_{\text{э}}$ , при котором искомое  $R$  имеет то же значение, что и в принятой схеме заземлителя в двухслойной земле;
- вычисляют:
- длину одной стороны модели, равную  $\sqrt{S}$ , м;
- количество ячеек  $m$  по одной стороне модели

$$m = \frac{L_{\Gamma}}{2\sqrt{S}} - 1.$$

Если  $m$  окажется дробным числом, его округляют до целого числа, после чего уточняют значение  $L_{\Gamma}$ :

$$L_{\Gamma} = 2(m+1)\sqrt{S};$$

Длину стороны ячейки в модели  $b$ :

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m};$$

- количество вертикальных электродов  $n$ , задавшись расстоянием  $a$ , м, между ними или (если  $n$  известно) расстояние  $a$ , предварительно наметив расположение этих электродов на схеме модели (обычно их располагают по периметру заземлителя). В этом случае  $n$  или  $a$  вычисляют по формуле

$$na = 4\sqrt{S};$$

- суммарную длину  $L_{\text{в}}$  вертикальных электродов  $L_{\text{в}} = nl_{\text{в}}$ ;
- относительную глубину погружения в землю вертикальных электродов  $t_{\text{отн}}$ ;
- относительную длину  $l_{\text{отн}}$  верхней части вертикального заземлителя, т. е. части, находящейся в верхнем слое земли;
- расчетное эквивалентное удельное сопротивление земли  $\rho_{\text{э}}$  для сложного заземлителя (горизонтальная сетка с вертикальными электродами);
- искомое расчетное сопротивление  $R$ .

### 1.7.3.1 Задачи для решения

**Задача 1.** На выделенном участке земли в климатической зоне местности II (см. таблицу 1.9) намечено сооружение группового заземлителя с использованием вертикальных стержневых и соединяющих их горизонтальных полосовых электродов. При этом верхние концы вертикальных электродов и

горизонтальные электроды погружены в землю на глубину  $t_1 = 0,8$  м. Длина и диаметр вертикального электрода  $L_B = 4,2$  м, его диаметр  $d = 0,05$  м. Длина горизонтального электрода  $L_T = 50$  м, его сечение  $S = 4 \times 40$  мм. Сопротивления растеканию тока с зонда при погружении его на глубину  $t_2 = 5$  м в разных местах участка составили:  $r_1 = 30$  Ом;  $r_2 = 26$  Ом;  $r_3 = 40$  Ом;  $r_4 = 22$  Ом (рисунок 1.53).

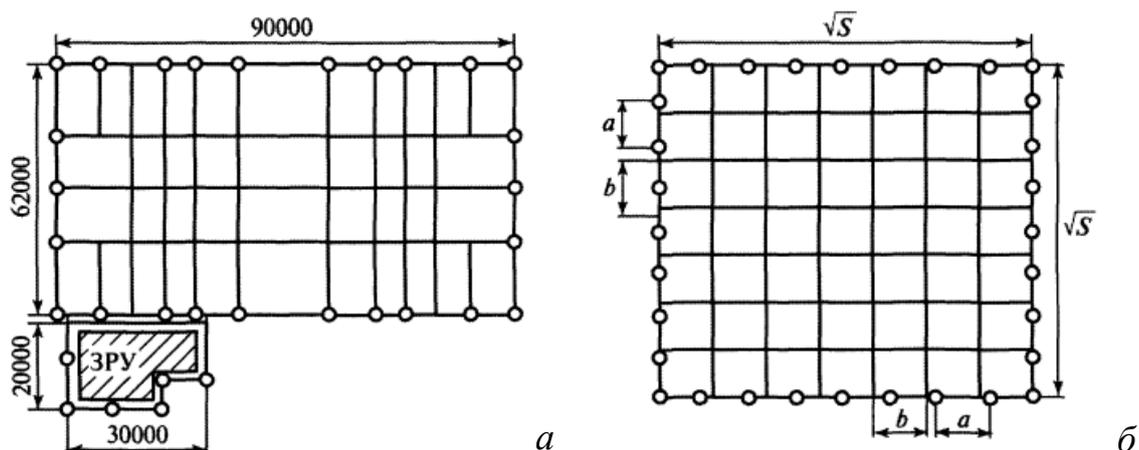
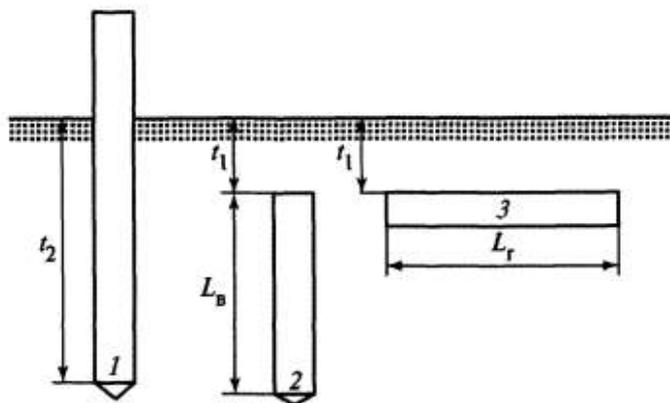


Рисунок 1.52 – Сложный заземлитель в двухслойном грунте:  
*a* – предварительная схема заземлителя; *б* – расчетная модель

Необходимо определить расчетные значения удельных сопротивлений однородной земли для одиночных вертикального и горизонтального заземлителей (электродов)  $\rho_{p.v}$  и  $\rho_{p.g}$  с учетом климатической зоны местности. С этой целью в четырех местах участка, на котором намечено сооружение заземлителя, были проведены измерения сопротивлений растекания одиночного заземлителя методом послойного зондирования с помощью вертикального зонда (электрода). При этом глубина погружения нижнего конца зонда составляла  $t_2 = 5$  м, что соответствовало предполагаемой глубине погружения нижних концов вертикальных электродов проектируемого заземлителя. Во время зондирования земля была малой влажности, количество осадков ниже нормы. (Коэффициент сезонности для однородной земли определяется по таблице 1.9).



1, 2 – вертикальные электроды, 3 – горизонтальный электрод заземлителя

Рисунок 1.53 – Измерение сопротивления земли методом зондирования

**Задача 2.** Для строящейся понижающей трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ городской кабельной сети решено соорудить заземлитель контурного типа. Заземлитель будет содержать 10 вертикальных электродов – отрезков угловой стали с шириной полок  $b = 50$  мм, каждый длиной  $L_B = 3$  м и горизонтальный электрод – стальную полосу сечением  $4 \times 20 = 80$  мм<sup>2</sup>, длиной  $L_T = 50$  м, соединяющую вертикальные электроды. На подстанции будут установлены два трехфазных трансформатора, работающих параллельно при изолированных нейтралях со стороны высшего напряжения и глухозаземленных нейтралях со стороны 400 В. Протяженность питающей кабельной сети 10 кВ  $L_{кл} = 40$  км, воздушная сеть отсутствует. Измеренное удельное сопротивление земли, полученное замером при повышенной влажности земли составило  $\rho = 65$  Ом·м. Расстояние между соседними вертикальными электродами  $a = 5$  м, глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода и глубина погружения горизонтального электрода  $t = 0,8$  м, земля – однородная (рисунок 1.54).

Необходимо рассчитать сопротивление заземлителя с целью проверки его соответствия требованиям ПУЭ. При этом надо иметь в виду, что заземлитель должен быть пригоден для установок как до, так и выше 1000 В вплоть до 35 кВ, т.е. его сопротивление  $r_3$  не должно быть выше 4 Ом в первом случае и  $125/I_3 \leq 10$  Ом во втором (где  $I_3$  – ток замыкания на землю, А). Расчет выполнить

методом коэффициентов использования по допустимому сопротивлению.

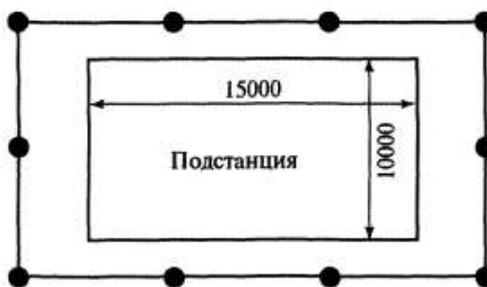


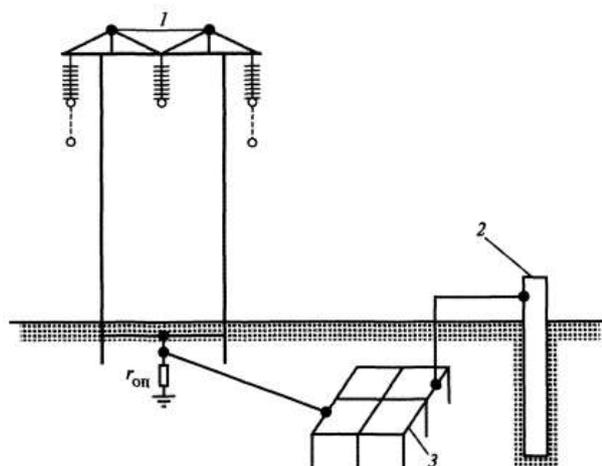
Рисунок 1.54 – Схема контурного заземлителя понижающей трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ

**Задача 3.** При проектировании заземляющего устройства трансформаторной подстанции 110/35/10 кВ было решено в дополнение к искусственному заземлителю использовать два естественных заземлителя: первый – грозозащитные тросы на опорах отходящей от подстанции воздушной линии электропередачи (ВЛ) 110 кВ; второй – стальная обсадная труба неиспользуемого артезианского колодца, находящегося вблизи строящейся подстанции. Таким образом, заземляющее устройство подстанции будет иметь три параллельно работающих заземлителя (два естественных и один искусственный) и должно обладать согласно требованиям ПУЭ сопротивлением  $R_3$  не более 0,5 Ом (рисунок 1.55).

Число опор ВЛ, несущих грозозащитные тросы,  $n_0=21$ ; число тросов на опоре  $n_T=2$ ; тросы стальные, активное сопротивление троса  $r_{Тр}=3,2$  Ом/км; длина пролета ВЛ  $L_{П}=200$  м; диаметр обсадной трубы  $d=0,1$  м; длина погруженной в землю части обсадной трубы  $L_T=14$  м; сопротивление заземлителя каждой опоры ВЛ  $r_{оп}=15$  Ом; земля однородная; расчетное удельное сопротивление земли с учетом сезонных изменений  $\rho_{рас}=190$  Ом·м.

Требуется определить значения сопротивлений, которыми обладают каждый естественный заземлитель  $R_{рас1}$  и  $R_{рас2}$ , и значение сопротивления, которым должен обладать искусственный заземлитель  $R_{и}$ .

**Задача 4.** Требуется вычислить сопротивление группового заземлителя в двухслойной земле, состоящего из вертикальных стержневых и горизонтальных полосовых электродов (рисунок 1.56).



1 – грозозащитные тросы; 2 – обсадная труба артезианского колодца;  
3 – искусственный заземлитель с вертикальными и горизонтальными электродами;  
 $r_{оп}$  – сопротивление заземления опоры ВЛ

Рисунок 1.55 – Схема исполнения заземлителя, состоящего из трех отдельных заземлителей

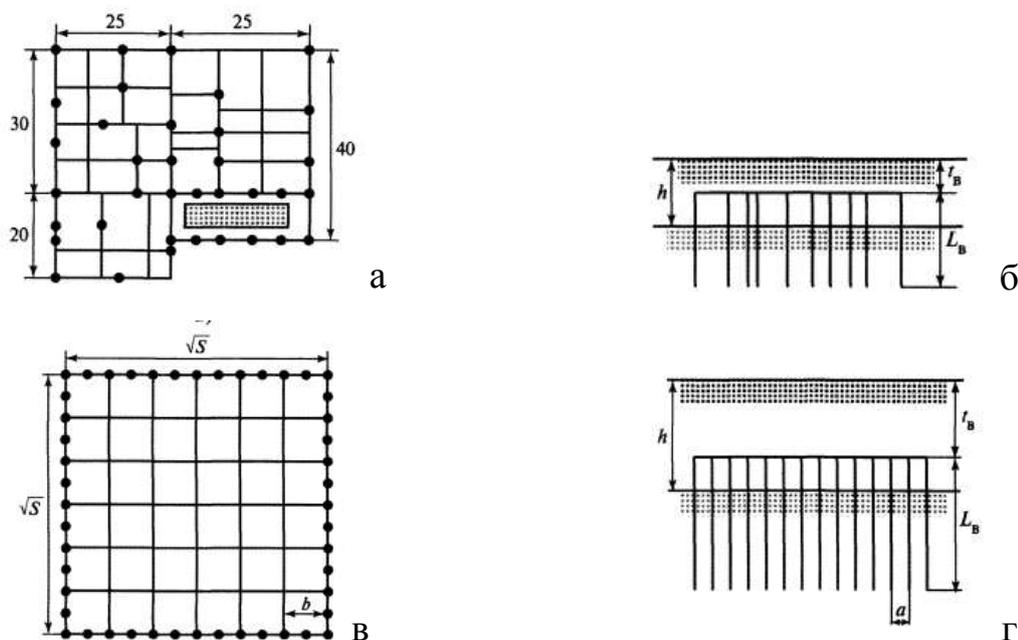


Рисунок 1.56 – Сложный групповой заземлитель:  
*а, б* – в виде горизонтальной решетки неправильной формы с неравномерным размещением вертикальных электродов; *в, г* – расчетная схема (модель) заземлителя в двухслойной земле в виде горизонтальной квадратной решетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерно размещенными по контуру сетки вертикальными электродами

Расчетные значения удельных сопротивлений верхнего и нижнего слоев земли  $\rho_1=150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_2=50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ; толщина (мощность) верхнего слоя земли

$h=2$  м; длина вертикального электрода  $L_B=4$  м; глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода  $t_B=0,5$  м. Суммарная длина горизонтальных электродов  $L_T=650$  м; количество вертикальных электродов  $n=36$ ; площадь, занимаемую заземлителем,  $S=2250$  м<sup>2</sup>.

**Задача 5.** Имеется схема сложного заземлителя в однослойной земле, рисунок 1.57. Составим условную расчетную модель (схему) этого заземлителя. Модель должна представлять собой горизонтальную квадратную решетку из взаимно пересекающихся горизонтальных полосовых электродов, а также вертикально вбитых в землю по периметру решетки стержневых электродов. Она должна иметь практически такие же, как у действительной (предварительной) схемы заземлителя, параметры: площадь  $S$ ; суммарную длину горизонтальных электродов  $L_T$ ; количество  $n$  и длину  $L_B$  каждого вертикального электрода; глубину погружения вертикальных электродов в землю.

При этих условиях расчетная модель, будучи погруженной в однородную землю с расчетным удельным сопротивлением  $\rho$ , будет обладать сопротивлением  $r_z$ , равным сопротивлению действительной схемы заземлителя.

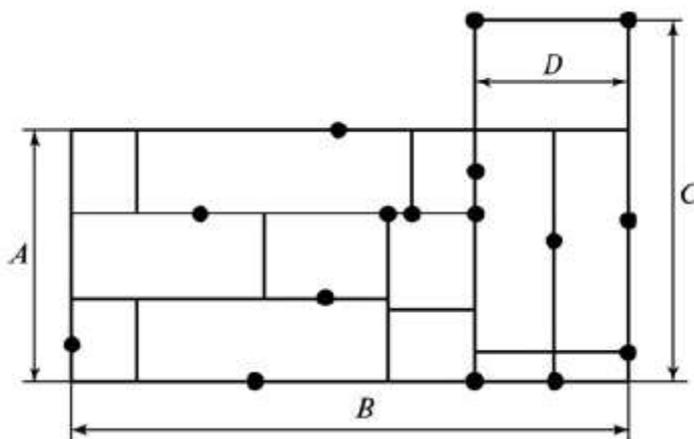


Рисунок 1.57 – Сложный групповой заземлитель в однослойной земле

Требуется вычислить сопротивление заземлителя и изобразить расчетную схему (модель) заземлителя, указав на ней соответствующие размеры при следующих размерах размеры действительной модели:  $A = 15$  м;  $B = 29$  м;  $C = 20$  м;  $D = 10$  м; длина и количество вертикальных электродов  $L_B = 4$  м,

$n = 21$  шт.; глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода  $t_b = 0,8$  м; удельное сопротивление земли  $\rho = 100$  Ом·м.

**Задача 6.** Имеется сложный групповой заземлитель в виде горизонтальной квадратной решетки с квадратными ячейками одинакового размера. Решетка выполнена из полосовой стали без вертикальных электродов. Она погружена в землю параллельно ее поверхности на глубину  $t$ . Требуется вычислить сопротивление этого заземлителя  $r_3$  при: длине одной стороны решетки (квадрата)  $S = 20$  м; количестве ячеек вдоль каждой стороны решетки  $m = 5$ ; длине стороны каждой ячейки  $b = 4$  м; глубине погружения решетки в землю  $t = 0,8$  м; однородной земле с расчетным значением удельного сопротивления  $\rho = 80$  Ом·м.

### 1.7.3.2 Численный расчет растекания токов с заземлителя

Цель работы – численный расчет растекания токов с заземлителя.

Работа выполняется в студенческой версии системы ELCUT.

Прохождение тока в земле носит специфический характер, вызванный особыми свойствами земли как проводника электрического тока. Рассмотрим картину стекания постоянного тока в землю через одиночный заземлитель  $A$  – металлический стержень, погруженный вертикально в однородный грунт (рисунок 1.58). Ток растекается во все стороны от заземлителя по значительному объему земли, при этом плотность тока имеет наибольшее значение вблизи заземлителя. По мере удаления от заземлителя ток проходит по все большему сечению земли и сопротивление растеканию тока уменьшается.

Величина электрического сопротивления растеканию является главной характеристикой заземляющего устройства. Сопротивление растеканию состоит из сопротивления пути растекания тока в землю и переходного сопротивления от заземлителя к грунту. Однако переходное сопротивление имеет незначительную величину и им можно пренебречь. Сопротивление земли зависит от проводящих свойств грунта и от распределения тока в земле,

которое определяется размерами и формой заземлителей, а также их взаимным расположением (при нескольких заземлителях).

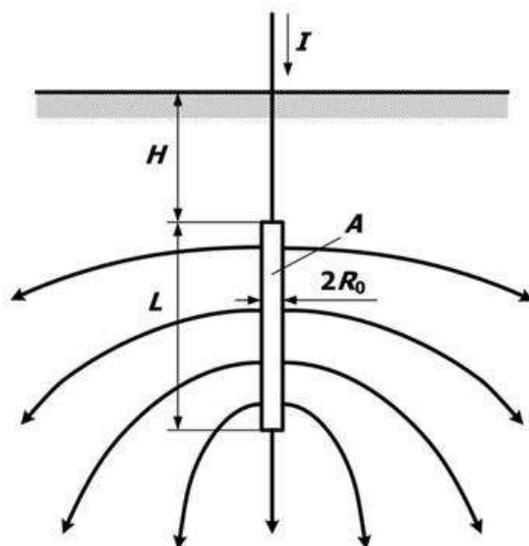


Рисунок 1.58 – Картина электрического поля в земле при растекании тока с одиночного стержневого заземлителя

Необходимо отметить, что в земле линии тока не уходят в бесконечность, как на рисунок 1.58, а собираются у другого электрода или места повреждения изоляции (например, при замыкании на землю). Однако это явление при значительном расстоянии между электродами не оказывает заметного влияния на распределение линий тока около электродов, а следовательно, и на соответствующее ему сопротивление растеканию. Сопротивление растеканию заземлителя определяется как отношение напряжения на нем  $U_0$  (потенциала поверхности электрода) к току, протекающему через него в землю:

$$R = U_0/I. \quad (1.24)$$

Как уже было отмечено выше, аналитические методы решения уравнений электрического поля постоянных токов в проводящей среде позволяют получить формулы для расчета сопротивления заземлителей простейших форм. В частности, сопротивление заземления для электрода в форме вертикальной трубы, расположенного у поверхности земли ( $H = 0$ ) выражается формулой:

$$R = \rho \frac{\ln \frac{2L}{R_0}}{2\pi L}.$$

Сопротивление заземления для электрода в форме полушара радиуса  $R_0$ , расположенного у поверхности земли равно:

$$R = \frac{\rho}{2\pi R_0},$$

а сопротивление для шарового электрода радиуса  $R_0$ , погруженного в землю столь глубоко, что можно пренебречь влиянием поверхности земли, определяется как

$$R = \frac{\rho}{4\pi R_0}.$$

При нахождении вблизи места расположения заземлителя на человека действует так называемое шаговое напряжение, которое представляет собой разность потенциалов между двумя точками на поверхности почвы, отстоящими на 0,8 м (средняя длина шага) друг от друга. В результате, человек, приближающийся к зарытому в землю электроду, может оказаться под опасным для здоровья напряжением, которое в соответствии с принятыми нормами не должно превышать 150 В. По мере удаления от заземлителя величина шагового напряжения уменьшается. Напряжение шага может быть равным нулю и в непосредственной близости к заземлителю, если обе ноги человека находятся на одной эквипотенциальной поверхности.

#### 1.7.3.2.1 Задание на работу

1. Исследовать поле вертикального стержневого заземлителя при различной глубине залегания ( $H = 0, 0,25, 0,5$  м) в однородном грунте.
2. Оценить влияние неоднородности грунта для стержневого заземлителя, расположенного у поверхности земли.
3. Сопоставить результаты согласно п. 1, 2 и сформулировать рекомендации.
4. Оформить отчет по работе.

Номер варианта задания определяется преподавателем (таблица 1.10). Значения удельных сопротивлений грунтов приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.10 – Варианты задания

№ вар-та	$U_0$ , кВ	грунт	$R_0$ , см	$L$ , см	$H_1$ , см	покрытие
1	3	песок	2	40	30	глина
2	3	суглинок	2	45	30	песок
3	3	глина	2	50	30	суглинок
4	6	песок	3	40	30	глина
5	6	суглинок	3	45	30	песок
6	6	глина	3	50	30	суглинок
7	10	песок	4	50	30	глина
8	10	суглинок	4	55	30	песок
9	10	глина	4	55	30	суглинок

### 1.7.3.2 Методические указания к работе

При создании расчетной модели следует учесть наличие её осевой симметрии (рисунок 1.59). Внешние границы расчетной модели должны быть расположены таким образом, чтобы имитировать бесконечное удаление (отсутствие изменение поля в нормальном направлении к границе). Для данных вариантов заданий принять размеры расчетной области  $1,5 \times 2,5$  м.

Граничные условия:

- поверхность заземлителя: потенциал  $U_0$ ;
- бесконечно-удаленные границы: нулевой потенциал;
- ось симметрии:  $j_n = 0$ ;
- поверхность земли:  $j_n = 0$ .

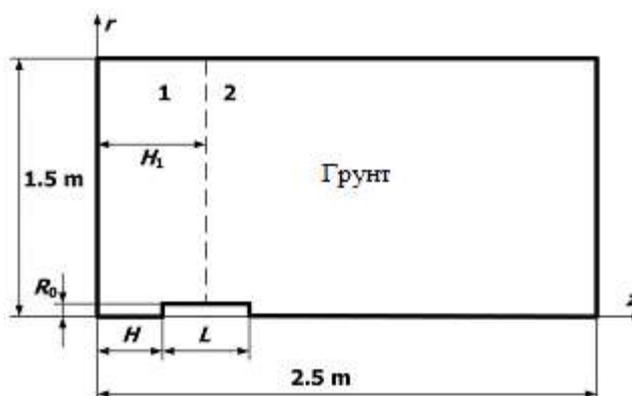


Рисунок 1.59 – Геометрическая модель задачи с учетом осевой симметрии

Тип задачи – электрическое поле постоянных токов; класс модели – осимметричная; единицы длины – сантиметры; координаты – декартовы. При создании сетки стоит помнить, что используемая студенческая версия ELCUT

имеет ограничение в 255 конечных элементов.

После получения решения необходимо построить изолинии потенциала. Полученную картину привести в отчете. Далее построить зависимость потенциала вдоль поверхности земли («Контур»–«Добавить (Линия/Ребро/Блок)»), при необходимости сменить направление контура, чтобы он шел от оси симметрии наружу («Контур»–«Сменить направление»). Полученную зависимость включить в отчет. Аналогично получить зависимость плотности тока вдоль оси симметрии (результат включить в отчет).

Затем рассчитать величину полного тока, стекающего с поверхности заземлителя, для этого выделить контур интегрирования – поверхность заземлителя, и через «Вид» – «Интегральные значения» – «Электрический ток через заданную поверхность», получить искомое значение. Полученное значение использовать для расчета сопротивления заземления по формуле (1.24). Значения привести в отчете. Далее в соответствии с заданием на работы произвести необходимые изменения в геометрии задачи и получить результаты для последующего анализа.

### **1.7.3.2.3 Содержание и требования к оформлению отчета**

Отчет должен содержать титульный лист, название работы и цель работы, исходные данные, результаты расчетов, таблицы и графики, анализ результатов и выводы по работе.

Оформление должно соответствовать ОС ТУСУР 01-2013 "работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления".

## **1.8 Рекомендации по диагностике состояния заземляющих устройств**

Как было показано выше характеристикой заземлителя является сопротивление растеканию тока с элементов заземлителя в землю, а характеристикой заземляющего устройства – его сопротивление, равное сумме сопротивлений растеканию заземлителя и заземляющих проводников. Согласно

ПУЭ нормирование сопротивлений заземляющих устройств ставится в зависимость от удельного сопротивления грунта, в котором расположен заземлитель заземляющего устройства. Таким образом, значение удельного сопротивления грунта необходимо не только для проектирования ЗУ, но и для проверки на соответствие его основной электрической характеристики – сопротивления растеканию тока с заземлителя в землю – действующим нормам.

Между отдельными элементами заземляющих устройств подстанций систем электроснабжения может существовать плохая электрическая связь. Это вызвано некачественным монтажом при строительстве, коррозией заземлителей, их механическим повреждением. В зданиях и сооружениях часто отсутствует надлежащая связь между отдельными фрагментами системы заземления и главной шиной уравнивания потенциалов. Подобные дефекты, в случае протекания по ЗУ тока молнии или тока КЗ, могут привести к появлению в пределах заземляющего устройства электроустановки высоких разностей потенциалов, опасных для персонала, изоляции цепей различного назначения, а также способных вызывать сбои и повреждения электронной аппаратуры.

Для выявления подобных дефектов используются различные методики, сводящиеся к измерению удельного сопротивления грунта, сопротивления заземляющего устройства электроустановки и сопротивления связи между элементами заземляющего устройства.

### **1.8.1 Измерение удельного сопротивления грунта**

Достоверные сведения о сопротивлении растеканию тока с элементов заземлителя и заземляющих проводников могут быть получены в результате непосредственного измерения удельного сопротивления грунта перед началом сооружения ЗУ и в процессе его эксплуатационного контроля. На практике наибольшее распространение получили два способа измерения  $\rho$  грунта: метод пробного электрода и метод вертикального электрического зондирования.

### 1.8.1.1 Метод пробного электрода

На территории, предназначенной для сооружения ЗУ, в землю закладывают одиночные вертикальный или горизонтальный заземлители (пробные) обычно такой же длины, как у будущего. Измеряют сопротивление растеканию пробного электрода и определяют удельное электрическое сопротивление земли. Его величина в дальнейшем используется в расчетах реального заземляющего устройства.

В настоящее время метод применяют лишь в крайних случаях при сооружении ЗУ электроустановок напряжением до 1000 В с различными системами заземления нейтрали и выше 1000 В с изолированной нейтралью, главным образом тогда, когда заведомо известно, что удельное сопротивление поверхностного слоя велико.

### 1.8.1.2 Метод вертикального электрического зондирования

В электроэнергетике для измерения удельного сопротивления грунта наибольшее распространение получила установка, схема которой приведена на рисунке 1.60а. Она состоит из генератора стабилизированного электрического тока, микровольтметра с делителем напряжения и схемой замещения измеряемого сигнала собственным сигналом, двух потенциальных электродов  $M$  и  $N$  и двух токовых электродов  $A$  и  $B$ , которые перед зондированием погружают в землю. Электрод  $A$  располагают на равном расстоянии от электродов  $M$  и  $N$ , чтобы наводимая им разность потенциалов на электродах  $M$  и  $N$  равнялась нулю. Кроме этого, между электродами  $A$  и  $M$ ,  $A$  и  $N$  в земле не должно быть местных поверхностных включений с удельным сопротивлением, отличным от удельного сопротивления земли, которые могут сделать разность потенциалов между потенциальными электродами отличной от нуля, что приведет к погрешности измерения.

Недостатком рассмотренной установки является погрешность (иногда значительная), возникающая при вертикальном электрическом зондировании земли в местах с локальными поверхностными включениями, удельное

сопротивление которых существенно отличается от  $\rho$  зондируемой земли. Этот недостаток может быть устранен, если в рассматриваемой установке функцию токового электрода  $A$  возложить на потенциальные электроды  $M$  и  $N$ , одновременно выполняющие и свою собственную функцию (рисунке 1.60б). Ток на эти потенциальные электроды подается от генератора через два резистора равного номинала.

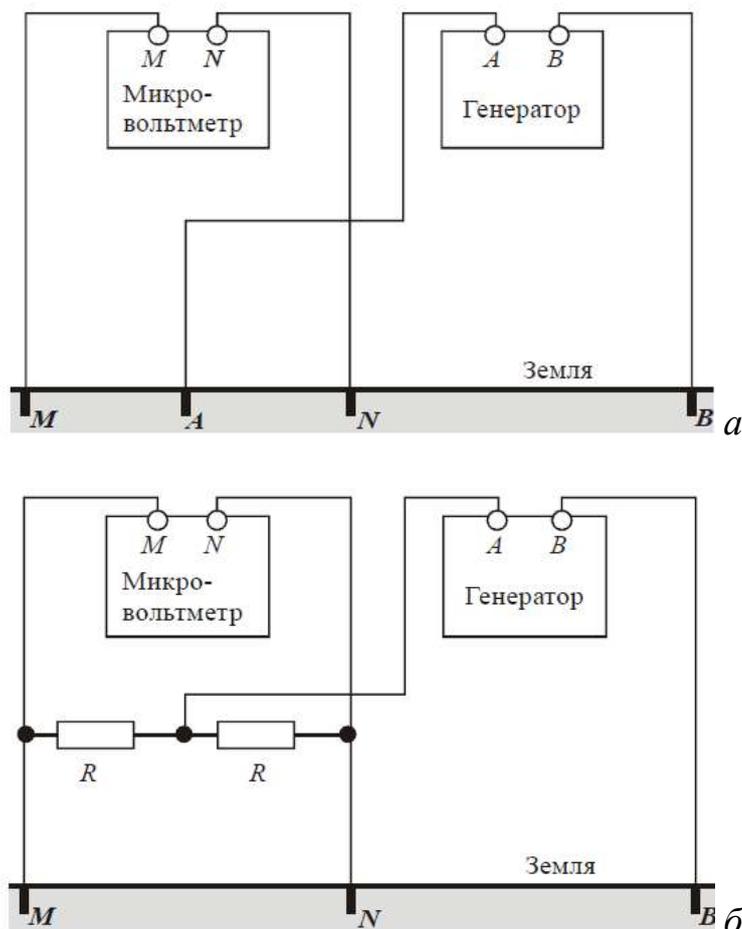


Рисунок 1.60 – Схема установки для вертикального электрического зондирования земли (а) и схема, повышающая его точность

Номинал каждого из резисторов  $R$  должен удовлетворять неравенству:

$$R \leq \frac{10^4 - R_B}{2},$$

где  $R_B$  – сопротивление токового электрода  $B$ , Ом

Указанное неравенство получено экспериментальным путем, исходя из двух условий:

- сопротивления не должны вносить искажений в стабилизацию электрического тока от генератора;
- сопротивления не должны вносить искажений в делители напряжения микровольтметра.

Так как резисторы имеют один номинал, то напряжение между потенциальными электродами  $M$  и  $N$  будет наводиться только одним токовым электродом  $B$ . Это повышает точность вертикального электрического зондирования земли. Удельное сопротивление грунта определяется по соотношению:

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} 2\pi \left( \frac{MN}{2} + NB \right) \left( \frac{\frac{MN}{2} + NB}{MN} - \frac{MN}{4 \left( \frac{MN}{2} + NB \right)} \right),$$

где  $\Delta U$  – разность потенциалов между электродами  $M$  и  $N$ ;  $MN$ ,  $NB$  – расстояние между соответствующими электродами. Данное соотношение справедливо для обеих установок, схемы которых приведены на рисунке рисунке 1.60, т.к. взаимное расположение электродов в них неизменно.

### 1.8.2 Эксплуатационный контроль сопротивления заземляющего устройства электроустановки

На практике сопротивление ЗУ часто измеряют по методу амперметра и вольтметра (рисунок 1.61). Через заземлитель  $З$  заземляющего устройства и вспомогательный токовый электрод  $T$  пропускают электрический ток (измеряется амперметром  $1$ ) от специального источника тока  $2$ . Возникающее при этом напряжение на заземляющем устройстве измеряют вольтметром  $3$ , включенным между заземляющим устройством и вспомогательным потенциальным электродом  $П$ .

Искомое сопротивление определяют по формуле  $R_{ЗУ} = U/I$ , где  $U$  – напряжение, измеренное вольтметром, В;  $I$  – ток, измеренный амперметром, А.

Размещать электроды следует на достаточно большом расстоянии как от заземлителя  $З$  заземляющего устройства, так и друг от друга. Теоретически

каждое из этих расстояний должно быть равно бесконечности. Кроме этого, в земле в зонах между заземлителем и электродами не должно быть металлических коммуникаций, искажающих электрическое поле.

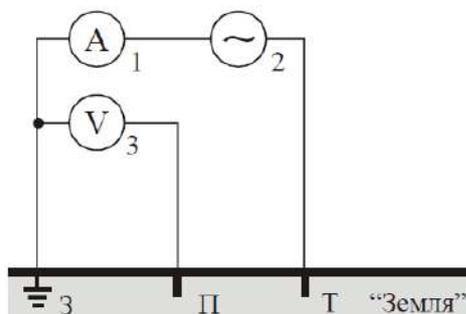


Рисунок 1.61 – Принципиальная схема измерения сопротивления заземляющего устройства методом амперметра и вольтметра

Погрешность измерения данным способом обусловлена конечными расстояниями между электродами и заземлителем, а также наличием в земле (особенно в населенных пунктах) разного рода металлических трубопроводов, оболочек кабелей и других металлических коммуникаций.

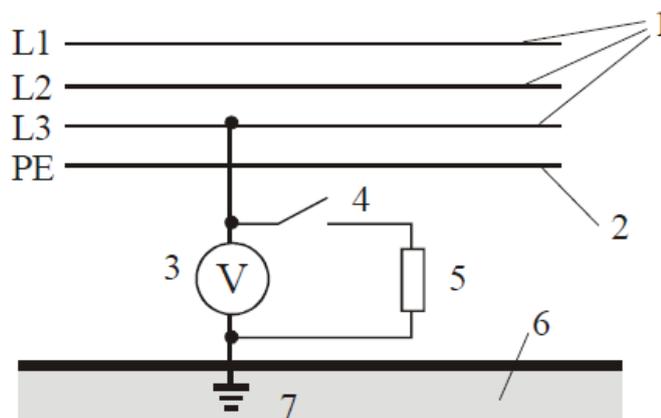
Точность измерений повышается при реализации схемы, приведенной на рисунке 1.62. Ток, проходящий через ЗУ, рассчитывается по сопротивлению калибровочного резистора и напряжению на нем как частное от деления напряжения на сопротивление. Напряжение на заземляющем устройстве определяется как разность между фазным напряжением электрической сети и напряжением на калибровочном резисторе. Сопротивление заземляющего устройства рассчитывается по соотношению:

$$R_{3у} = \frac{R_{кр} (U_{\phi} - U_{кр})}{U_{кр}}$$

где  $R_{кр}$  – сопротивление калибровочного резистора;  $U_{\phi}$  – фазное напряжение сети;  $U_{кр}$  – напряжение на калибровочном резисторе.

Рассмотрим пример реализации способа с использованием калибровочного резистора. Отсоединяют заземлитель 7 заземляющего устройства от защитного провода 2 электрической сети (от провода РЕ). Между заземлителем 7 и одним из фазных проводов 1 электрической сети напряжением 380/220 В включают вольтметр 3 (выключатель 4 находится в разомкнутом состоянии) и измеряют

фазное напряжение (пусть  $U_{\phi} = 218 \text{ В}$ ). Затем включают выключатель 4 и тем самым параллельно вольтметру 3 подключают калибровочный резистор 5 (предположим  $R_{кр} = 50 \text{ Ом}$ , а  $U_{кр} = 185 \text{ В}$ ). Искомое сопротивление заземлителя будет тогда равно 8,9 Ом.



1 – фазные проводники, 2 – защитный РЕ-проводник, 3 – вольтметр, 4 – выключатель, 5 – калибровочный резистор, 6 – земля, 7 – заземлитель заземляющего устройства  
Рисунок 1.62 – Принципиальная схема измерения сопротивления заземляющего устройства с использованием калибровочного резистора:

В приведенном примере не учтено сопротивление заземления нейтрали трансформатора на подстанции и связанных с нею РЕ и PEN-проводов. Сделано это, исходя из следующего:

- Сопротивление заземления нейтрали на порядок ниже измеряемых сопротивлений (по ПУЭ для сетей напряжением 380/220 В оно не должно превышать 4 Ом, а сопротивление повторного заземления нулевого провода, т.е. измеряемого сопротивления – 30 Ом). Так как проводимость заземления нейтрали складывается из проводимости заземлителя, расположенного непосредственно у нейтрали, и проводимостей множества заземлителей, расположенных вдоль каждой отходящей от подстанции линии и служащих для повторных заземлений РЕ и PEN проводников, то общее сопротивление заземления нейтрали в действительности много меньше (в большинстве случаев – меньше 1 Ом). Неучет его приводит к погрешности не выше 10%, но при этом упрощается процедура измерения.

- При разработке требований ПУЭ к нормированию сопротивлений ЗУ был принят во внимание тот факт, что уровень электробезопасности у потребителя растет с увеличением сопротивления нейтрали. Поэтому в методике измерения и приведенной выше формуле для  $R_{ЗУ}$  сопротивление заземления нейтрали не учитывается. Это ведет к получению завышенного значения  $R_{ЗУ}$ , следовательно, если измеренное значение будет соответствовать нормируемому, то фактическое никогда не будет выше измеренного и электробезопасность у потребителя (при прочих равных условиях) будет обеспечена.

### **1.8.3 Измерение сопротивления связи между элементами заземляющего устройства**

Дефекты ЗУ выявляют по результатам измерения сопротивления связи между всеми основными доступными для прикосновения элементами заземляющего устройства и некоторой единой опорной точкой. Наличие единой опорной точки является важным моментом, т.к. обычно диагностика контактных соединений (замер переходного сопротивления между корпусом (шасси) аппарата или конструкции и заземляющим проводником, или даже вскрытым заземлителем на ОРУ подстанции) при всей очевидной полезности такой операции не дает гарантии электрической целостности связи в ЗУ объекта. Это обусловлено тем, что проложенные в грунте заземлители подвержены коррозии, иногда их разрушение вызвано строительными работами, некачественной сваркой и т.п. В этих условиях заземляющий проводник или заземлитель, связь с которым проверяется, может сам оказаться не связанным с основной частью заземляющего устройства объекта.

В "Методических указаниях по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок" (РД 153-34.0-20.525-00 РАО "ЕЭС России") на подстанциях рекомендуется измерять сопротивление связи между заземлением аппаратов и конструкций на ОРУ, с одной стороны, и заземлением нейтрали

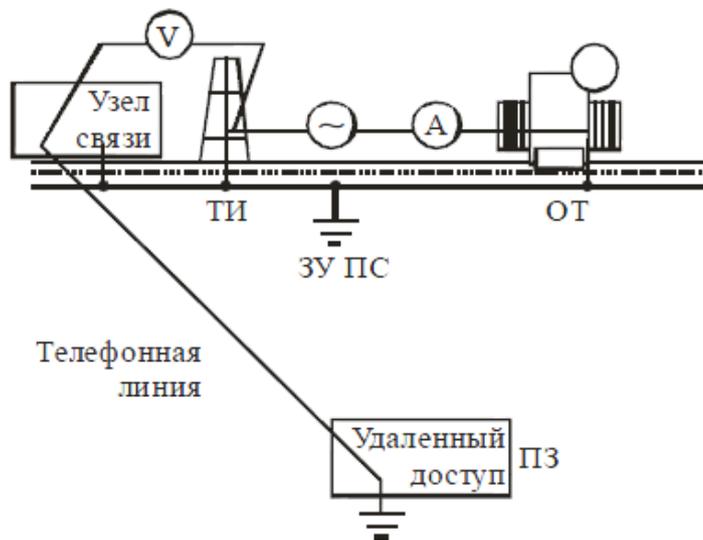
одного из трансформаторов. В качестве предельно допустимого значения принимается величина 0,2 Ом.

На реальных объектах длина измерительных цепей достигает сотен метров. Для получения достоверных результатов измерения должны проводиться по четырехпроводной схеме, т.е. должны использоваться отдельные проводники для подачи измерительного тока и для измерения разности потенциалов. Такие или подобные им измерения уже дают намного более полную информацию об электрической целостности заземляющих устройств.

Для выявления характера связи между заземлением какого-либо аппарата и ЗУ объекта, а также для определения величины этого сопротивления может применяться методика измерения сопротивления основания относительно опорной точки (рисунок 1.63). Один из потенциальных полюсов измерительного прибора присоединяется к заземлению проверяемого аппарата (конструкции), а второй – к дополнительной опорной точке, предназначенной для измерения потенциала (например, к удаленному зонду или заземлению релейного щита подстанции), а не к той же опорной точке, что при вводе тока. В качестве внешнего зонда может быть использована, например, выведенная из работы телефонная пара, заземленная на удаленном объекте. На узле связи подстанции эта пара кроссируется к точке измерения на ОРУ и присоединяется к одному из полюсов измерителя напряжения. Вторым полюсом измерителя напряжения вместе со вторым полюсом источника тока присоединяется к заземлению измеряемого аппарата (конструкции). В итоге для определения сопротивления основания требуется разделить значение напряжения между точкой измерения и потенциальным зондом на величину тока нагрузки.

Когда между двумя заземленными и связанными между собой протяженным проводом конструкциями А и Б расщепленного устройства будет включен источник тока, то по заземлителю и прилегающему к нему грунту потечет ток земляного возврата (рисунок 1.64). Если бы земля являлась изолятором, то весь ток возвращался бы к генератору по продольному заземлителю. Распределение

потенциала вдоль заземлителя было бы равномерным (рисунок 1.65, кривая 1), т.к. его погонное сопротивление остается неизменным по длине.



ПЗ – потенциальный зонд (удаленный объект с собственным ЗУ, связанный с подстанцией линией связи), ТИ – точка измерения, ОТ – опорная точка (один из силовых трансформаторов), V – селективный вольтметр

Рисунок 1.63 – Измерение сопротивления основания:

В реальности земля имеет конечную (отличную от нуля) проводимость. Ток по мере удаления от места его ввода перераспределяется между продольным заземлителем и землей. Вблизи точек ввода и вывода тока занятый им объем грунта будет небольшим, но он быстро увеличивается по мере удаления от концов заземлителя к его середине. На объектах электроэнергетики это усиливается тем, что в растекании тока принимает участие большое количество заземлителей, образующих сложный заземлитель сетчатой структуры.

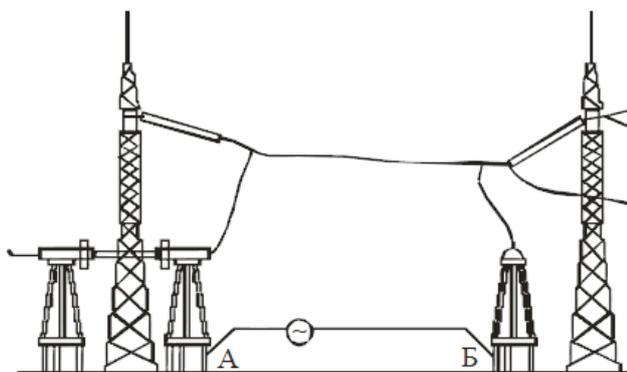


Рисунок 1.64 – Схема протекания тока с возвратом через заземляющее устройство

Если считать продольный заземлитель вместе с объемом грунта, по которому протекает ток, некоторым эквивалентным проводником тока земляного возврата, то этот проводник будет иметь переменное сечение: наибольшее – в середине, наименьшее – в точках ввода и вывода тока, т.е. в точках А и Б. Соответственно погонное сопротивление такого проводника будет наибольшим вблизи его концов, а распределение мгновенного значения потенциала вдоль него будет неравномерным. При протекании тока по петле в пределах ЗУ максимум потенциала (по модулю) оказывается в точке ввода тока, затем снижается (рисунок 1.65, кривая 2).

Сопротивление электрической связи между двумя точками А и Б заземляющего устройства можно (с некоторой погрешностью) представить суммой двух сопротивлений: сопротивления основания конструкции А и сопротивления основания конструкции Б. Под сопротивлением основания конструкции А или Б при этом понимается отношение потенциала, измеренного в точке А (или соответственно Б), к току генератора, включенного между ними. Сопротивления оснований конструкций А и Б в сумме дают сопротивление связи между конструкциями А и Б, измеренное в соответствии с РД 153-34.0-20.525-00.

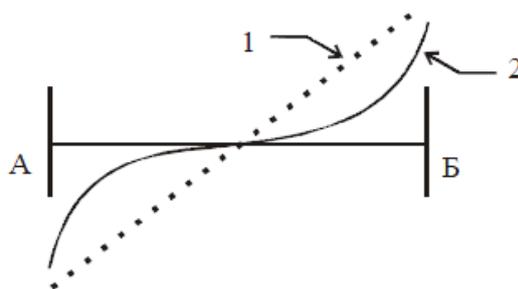


Рисунок 1.65 – Эпюры напряжения вдоль заземлителя, связывающего конструкции А и Б: 1 – в случае бесконечно большого удельного сопротивления земли; 2 – для реального сопротивления земли

Для находящегося в хорошем состоянии ЗУ величина сопротивления основания лежит в пределах 0,1 Ом. Значения порядка 0,5 Ом и выше свидетельствуют о нарушении металлосвязи с заземляющим устройством. Методика измерений сопротивлений оснований имеет ряд преимуществ, в

первую очередь – понятный физический смысл подобных измерений. Во-вторых, если в качестве дополнительной опорной точки при измерении потенциала выбирается заземление релейного щита (РЩ) подстанции, то умножение величины сопротивления на ток КЗ дает оценку разности потенциалов, которая при КЗ на проверяемый аппарат (конструкцию) будет приложена к изоляции вторичных кабелей, подходящих к нему (к ней) или проходящих рядом и уходящих на РЩ.

В случае пробоя изоляции, а также, если вторичные цепи заземляются на ОРУ, эта разность потенциалов будет приложена непосредственно к входам аппаратуры на РЩ. Оценка является строгой, если весь ток подпитки КЗ возвращается к нейтрали трансформатора, выбранного в качестве опорной точки для токовой цепи. В реальности подпитка места КЗ частично происходит из энергосистемы. При этом для более точной оценки разности потенциалов применяется методика имитационного моделирования, предусматривающая проведение нескольких измерений. Подобные измерения проводятся для отдельных аппаратов и конструкций, значения сопротивления основания которых близки к предельным (обычно 0,1–0,5 Ом, а при токах однофазных КЗ более 10 кА – даже менее 0,1 Ом). Это вызвано тем, что даже при наличии металlosвязи с заземляющим устройством разность потенциалов может оказаться значительной, т.е. существующих элементов системы заземления не всегда достаточно для эффективного выравнивания потенциалов.

В-третьих, при измерении сопротивления основания измеренное сопротивление характеризует связь именно проверяемого аппарата (конструкции) с ЗУ объекта. При измерении сопротивления связи качество связи проверяемой и опорной точек с заземляющим устройством в равной степени влияет на результирующую величину.

В-четвертых, при измерении сопротивления связи по четырехпроводной схеме токовая и потенциальная цепь на отдельных участках прокладываются параллельно. Это может исказить измеряемые значения за счет наводок со стороны токовой цепи. При измерении сопротивления основания такой

проблемы не возникает (т.к. токовая и потенциальная цепь не параллельны), а при измерении сопротивления связи ее можно решить, разнеся эти цепи на 10 м и больше.

В целом же оба метода позволяют получить информацию об электрической целостности заземляющего устройства. Оценка сопротивления связи и сопротивлений оснований отдельных элементов ЗУ производится без отсоединения грозозащитных тросов, оболочек отходящих кабелей и естественных заземлителей. При необходимости в ходе измерений оценивается вклад естественных заземлителей в полученную величину сопротивления.

В реальности картина измерений бывает сильно искажена помехами, практически неизбежными на территории действующего энергообъекта. Поэтому используются специальные интегрированные цифровые приборы, совмещающие в себе источник тока и селективный вольтметр. Рабочая частота приборов отличается от промышленной частоты и ее гармоник, обычно используется диапазон 50–150 Гц. Для обеспечения электромагнитной совместимости оборудования полезной является информация об изменении сопротивления ЗУ на высоких частотах.

Рассмотренные методы могут использоваться не только на подстанциях, но и внутри любых сооружений для контроля состояния ЗУ. В качестве опорной точки в этом случае выбирается главная шина уравнивания потенциалов в здании. Если применяется методика с дополнительным потенциальным зондом, то в качестве последнего может использоваться заземлитель, устанавливаемый, например, во дворе здания.

### **1.9 Комплексное обследование заземляющего устройства подстанции**

Цель работы – ознакомление с особенностями комплексного обследования заземляющих устройств. Для этого использован технический отчет обследования реальной подстанции «XYZ» (название ПС изменено). Для наглядности и общности изложения отчет приведен целиком (названия разделов соответствуют оригинальным), содержащий поясняющие

комментарии. В частности показано, что в ряде случаев требования по ЭМС и электробезопасности не выполняются, поэтому так же приведены мероприятия по устранению этих не соответствий. На основании которых была разработана рабочая документация на восстановление системы заземления данной ПС и произведен ремонт с последующей диагностикой ЗУ (отчет приведен в следующем разделе).

### 1.9.1 Введение

Работа по комплексному обследованию заземляющего устройства (ЗУ) ПС «XYZ» для обеспечения электробезопасности персонала и надежной работы первичного оборудования и систем вторичной коммутации проводится в соответствии с Техническим заданием к Договору №А от хх.уу.zz г.

Работы выполнялись в соответствии с требованиями:

- Действующих «Правил устройства электроустановок», ПУЭ, изд. 7, переработанное и дополненное, с изменениями. 2004 г. Глава 1.7. Заземление и защитные меры электробезопасности. Глава 4.2. Распределительные устройства и подстанции напряжением выше 1 кВ. Защита от грозových перенапряжений.
- РД 153-34.0-20.525-00. «Методические указания по проверке состояния заземляющих устройств электроустановок».
- РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования».
- СО 34.35.311.2004 «Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях».
- СО 153-34.21.122-2004 «Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций».
- ГОСТов, стандартов МЭК и рекомендациями другой нормативной и технической документации.

При проведении комплексного обследования ЗУ выполнялись следующие

виды работ:

- определения трасс прокладки заземлителей и заземляющих проводников (искусственных и естественных), глубины залегания, типа и сечения заземлителей; составления исполнительной схемы заземляющего устройства;
- измерения удельного сопротивления грунта: зависимости удельного сопротивления грунта от глубины, приведение к наиболее неблагоприятным климатическим условиям;
- измерения сопротивления ЗУ;
- расчет напряжения на ЗУ при коротких замыканиях на землю;
- измерения сопротивления металлосвязи оборудования с ЗУ;
- измерения напряжения прикосновения на оборудовании при имитации КЗ на землю, расчет напряжения прикосновения при заданных токах однофазного короткого замыкания;
- измерения распределения потенциалов и токов по ЗУ при имитации КЗ на землю, расчет токов и напряжений промышленной частоты, воздействующих на вторичное оборудование и системы связи;
- измерения импульсного сопротивления ЗУ оборудования и импульсных помех в цепях вторичной коммутации при имитации ВЧ составляющей тока КЗ;
- измерения импульсного сопротивления ЗУ молниеотводов, распределения токов и потенциалов по ЗУ при имитации удара молнии в молниеотводы,
- расчет токов и напряжений, воздействующих на первичное оборудование, вторичное оборудование и системы связи для нормированных параметров тока молнии;
- определения степени коррозии заземлителей и заземляющих проводников методом выборочного вскрытия грунта;

- проведения расчетов распределения напряжений и токов при КЗ на землю в первичных цепях (на шинах подстанции и ближнего КЗ) в соответствии с исполнительной схемой ЗУ;
- разработки проекта реконструкции заземляющего устройства.

Рассматривались следующие аварийные ситуации на объекте, приводящие к возникновению опасных производственных факторов для оперативного персонала и неправильной работе вторичного оборудования и систем связи:

- однофазные короткие замыкания на землю на ОРУ;
- удары молнии в молниеотводы и молниеприемники подстанции.

С точки зрения электробезопасности определялась возможность появления, при аварийных режимах, напряжений прикосновения, превышающих допустимые значения в соответствии с ПУЭ п.1.7.91 и ГОСТ 12.1.038-82. Критерием электробезопасности принималось условие обеспечения значений напряжений прикосновения к любому оборудованию ниже предельно допустимых значений в соответствии с ПУЭ п.1.7.91 и ГОСТ 12.1.038. Для оценки технического состояния заземляющего устройства проверялось соответствие состояния заземляющего устройства следующим требованиям ПУЭ:

- по коррозионному состоянию заземляющих проводников и заземлителей;
- по термическому нагреву заземляющих проводников и заземлителей при однофазном КЗ;
- к конструктивному выполнению;
- к ограничению напряжения на заземляющем устройстве при стекании с него тока замыкания на землю.

В качестве воздействий, приводящих к повреждению и (или) неправильной работе первичного оборудования, вторичного оборудования и систем связи, рассматривались:

- воздействие при однофазном КЗ токов и напряжений промышленной частоты на кабели вторичных цепей;
- воздействие на аппаратуру импульсных напряжений, вызванных повышением потенциала заземлителя при протекании ВЧ составляющей тока однофазного КЗ;
- воздействие на аппаратуру импульсных напряжений, вызванных ударами молнии.
- Для проведения расчетов ЗУ использовалась программа «ОРУ-М» версия 2.1.17.

По результатам комплексного обследования и расчетов заземляющего устройства ПС «XYZ» составлена Исполнительная схема заземляющего устройства подстанции, приведенная в Приложении 1 (не приведено в пособии). Результаты измерений и расчетов представлены в Протоколах, приведенных в Приложении 2 и Ведомости дефектов, приведенной в Приложении 3. По результатам обследования и расчетов заземляющего устройства ПС «XYZ» составлен Рабочий проект «Ремонт заземляющего устройства подстанции «XYZ», приведенный в Приложении 4.

### **1.9.2 Характеристика объекта**

Подстанция «XYZ» представляет собой подстанцию открытого типа 220/10кВ. От подстанции отходят 4 линии 220 кВ. На территории подстанции расположены следующие здания и сооружения:

- ОПУ, в котором расположены РЩ, ЗРУ-10 кВ.
- Схема распредустройства 220 кВ – секционированная система шин с обходной.
- В Приложении 5 приведена Электрическая схема подстанции.

Значение тока однофазного короткого замыкания на шинах 220 кВ составляет в месте КЗ – 3,078 кА.

Время срабатывания защиты при замыкании на землю на ОРУ-220кВ составляет основная защита – 0,1 с, резервная защита – более 1 с.

Прокладка существующих кабелей вторичных цепей от оборудования ОРУ-220 кВ до РЩ выполнена в кабельных лотках.

Молниезащита объекта осуществляется при помощи молниеприемников, установленных на прожекторных мачтах, молниеприемников, установленных на порталах и отдельно стоящих молниеотводов.

Материал заземляющих проводников – сталь полосовая 45x10 мм (сечение 450 мм<sup>2</sup>) и сталь круглая диаметром 12мм (сечение 113 мм<sup>2</sup>).

### **1.9.3 Результаты обследования состояния ЗУ объекта**

#### **1.9.3.1 Составление исполнительной схемы ЗУ**

По результатам измерений, проведенных с помощью трассоискателя (в составе измерительного комплекса КДЗ-1), была определена исполнительная схема заземляющего устройства подстанции, представленная в Приложении 1 на чертеже «Заземляющее устройство подстанции». Установлено, что заземляющее устройство подстанции не удовлетворяет требованиям по конструктивному исполнению:

- заземляющие устройства ОРУ соединены с ЗУ щита управления только через металлоконструкции в кабельном лотке;
- недостаточная связь ЗУ трансформаторов с ЗУ щита управления;
- ЗУ трансформаторов не соответствует ПУЭ.

#### **1.9.3.2 Определение наличия и качества металлосвязей**

Проверку целостности заземления оборудования выполняют путем измерения сопротивления металлосвязи между проверяемым оборудованием и некоторой опорной точкой (заземляющим проводником) ЗУ, имеющей металлосвязь с ЗУ электроустановки менее 0,05 Ом. Качество заземления оборудования считается удовлетворительным, если измеренное сопротивление не превышает:

$$R_{мсв}(\text{Ом}) < 2 (\text{кВ}) / I_{кз} (\text{кА}),$$

где  $I_{кз}$  – ток КЗ на шинах РУ.

Для оборудования ОРУ-220 кВ  $R_{мсв}$  не должно превышать 0,65 Ом.

С помощью измерительного комплекса КДЗ-1 определялось сопротивление металlosвязи силового оборудования с заземляющим устройством. Также осуществлялась проверка качества контактных соединений заземляемых элементов с ЗУ и коррозионное состояние заземляющих проводников. В качестве опорных точек при измерении сопротивления металlosвязи выбирались точки заземления нейтралей силовых трансформаторов.

При имитации КЗ на землю на силовом оборудовании также определялось количественное (в процентном отношении к току КЗ) растекание тока КЗ по заземляющим проводникам, кабелям, трубопроводам и металлоконструкциям. Результаты измерений представлены в Протоколе 1.

Установлено, что на подстанции имеется незаземленное оборудование и оборудование, связанное с основным ЗУ подстанции последовательно, только через металлоконструкции. Так же имеются обрывы заземляющих проводников.

Произведенная выборочно оценка степени коррозионного износа элементов ЗУ показала, что износ не превышает 20%. Согласно РД153-34.0-20.525-00 элемент ЗУ должен быть заменен, если разрушено более 50% его сечения. Элемент ЗУ должен быть также заменен или усилен, если коррозионное разрушение нарушает его термическую устойчивость.

### **1.9.3.3 Измерение значений удельного сопротивления грунта**

Измерение удельного сопротивления грунта согласно РД 153-34.0-20.525-00 определялось методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) с помощью прибора КДЗ-1. На территории ПС измерялось удельное сопротивление верхних слоев грунта, а за пределами ПС – нижних слоев грунта. Результаты измерений представлены в Протоколе 2. Зависимости «кажущегося» значения удельного сопротивления грунта  $\rho$  (Ом) от глубины (м) на территории подстанции и за ее пределами приведены на рисунке 1.66.

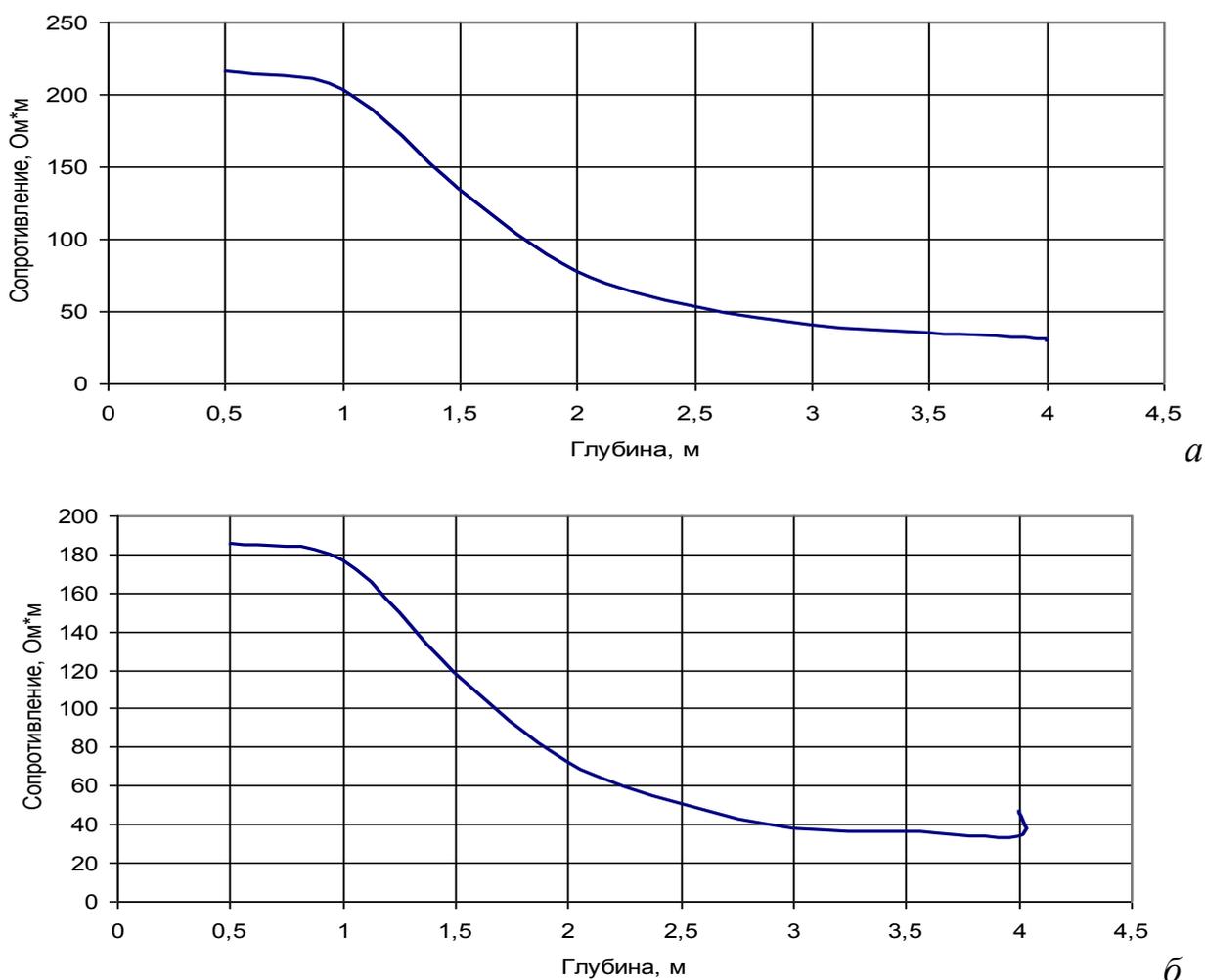


Рисунок 1.66 – Зависимости «кажущегося» значения удельного сопротивления грунта от глубины на территории ПС (а) и за её пределами (б)

Результаты измерений приведены к наиболее неблагоприятным климатическим условиям и двухслойной модели грунта (см. Протокол 2). Эквивалентное значение удельного сопротивления грунта  $\rho$ , приведенное к двухслойной модели, составило:  $\rho$  верхнего слоя 220 Ом·м,  $\rho$  нижнего слоя 30 Ом·м, толщина верхнего слоя 0,8 м. Эквивалентное значение удельного сопротивления грунта  $\rho$ , приведенное к двухслойной модели, с учетом промерзания грунта в зимний период составило:  $\rho$  верхнего слоя 220 Ом·м,  $\rho$  нижнего слоя 30 Ом·м, толщина верхнего слоя 2,4 м.

#### 1.9.3.4 Измерение и расчет сопротивления ЗУ ПС

Сопротивление ЗУ измерялось по методу амперметра-вольтметра с помощью прибора КДЗ-1 в соответствии с РД 153-34,0-20,525-00 п.2.4. Перед

началом измерений по исполнительной схеме ЗУ определялось место подключения источника переменного тока к ЗУ и место расположения токового электрода, вынесенного за пределы территории ЗУ. Результаты измерений представлены в Протоколе 3. Измерения на ОРУ-220 кВ показали  $R_{ЗУ} = 0,3 \text{ Ом}$

Расчеты сопротивления ЗУ и напряжения на ЗУ проводились с помощью программы «ОРУ-М» для двухслойной модели грунта. При проведении расчетов составлялась схема замещения исполнительной схемы ЗУ. Результаты измерений сопротивления ЗУ использовались для тестирования расчетной схемы. Результаты расчетов представлены в Протоколе 5. При полученных параметрах грунта расчетное значение сопротивления заземляющего устройства при КЗ на ОРУ-220 кВ не превысит 0,6 Ом. Расчетные значения напряжения на заземляющем устройстве ОРУ не превышают 1,8 кВ при КЗ на шинах ОРУ-220 кВ.

### **1.9.3.5 Измерение и расчет напряжений прикосновения.**

В соответствии с ПУЭ п.1.7.91 и ГОСТ 12.1.038-82, значения напряжения прикосновения для режимов однофазного КЗ не должны превышать 65 В (для времени срабатывания резервной защиты более 1 с) для рабочих мест, где при производстве оперативных переключений могут возникнуть КЗ на конструкции, доступной для прикосновения производящему переключения персоналу. При этом на остальных местах значения напряжения прикосновения не должны превышать 500 В (для времени срабатывания основной защиты 0,1 с).

Измерения напряжений прикосновения осуществлялись в соответствии с РД 153-34.0-20.525-00 п.2.5. при имитации КЗ на оборудовании, расположенном на участках ОРУ с недостаточным количеством продольных и поперечных горизонтальных заземлителей и на рабочих местах. Измеренные значения напряжения прикосновения приводятся к реальным значениям тока КЗ. Результаты измерений представлены в Протоколе 4. Проведенные измерения показали, что при однофазном КЗ на шинах ОРУ-220 кВ значения

напряжений прикосновения на оборудовании не превышают 500 В, что соответствует требованиям ПУЭ.

Значения напряжений прикосновения на рабочих местах около разъединителей на ОРУ-220 кВ при однофазном КЗ превышают 65 В, что не соответствует требованиям ПУЭ.

Управление разъединителями на ОРУ-220 кВ, как правило, осуществляется дистанционно. Однако, напряжение прикосновения на рабочих местах у разъединителей не должно превышать 65 В, поскольку возможно их отключение вручную в случае отказа дистанционного управления. Расчеты значений напряжения прикосновения с учетом промерзания грунта в зимний период проводились с помощью программы ОРУ-М для двухслойной модели грунта по составленной схеме замещения исполнительной схемы ЗУ.

Расчеты проводились для режимов однофазного КЗ на шинах ОРУ-220 кВ на оборудовании, расположенном на участках ОРУ, с недостаточным количеством продольных и поперечных горизонтальных заземлителей, образующих заземляющую сетку с ячейками больших размеров. Результаты измерений напряжения прикосновения использовались для тестирования расчетной модели. Точки, в которых проводились расчеты, указаны на исполнительной схеме ЗУ, приведенной в Приложении 1 на чертеже «Заземляющее устройство подстанции». Результаты расчета значений напряжений прикосновения представлены в Протоколе 6.

Проведенные расчеты показали, что при однофазном КЗ на шинах ОРУ-220 кВ значения напряжений прикосновения на оборудовании не превышают 500 В, что соответствует требованиям ПУЭ.

Значения напряжений прикосновения на рабочих местах около разъединителей на ОРУ-220 кВ при однофазном КЗ превышают 65 В, что не соответствует требованиям ПУЭ.

### 1.9.3.6 Расчет термического нагрева заземляющих проводников при коротких замыканиях на землю

В соответствии с ПУЭ п.1.7.114.в электроустановках напряжением выше 1 кВ сечения заземляющих проводников должны быть выбраны такими, чтобы при протекании по ним наибольшего тока однофазного КЗ в электроустановках с эффективно заземленной нейтралью или тока двухфазного КЗ в электроустановках с изолированной нейтралью температура заземляющих проводников не превысила 400°С (кратковременный нагрев, соответствующий полному времени действия защиты и отключения выключателя).

Минимально допустимое сечение проводников  $S$  заземляющего устройства определяется по следующему выражению, исходя из допустимой по ПУЭ температуры нагрева

$$S = \frac{I\sqrt{t}}{k},$$

где  $I$  – действующее значение тока короткого замыкания, протекающего по проводнику, А;  $t$  – время отключения короткого замыкания, с;  $k$  – коэффициент, значение которого зависит от материала проводника, его начальной и конечной температур

$$k = \sqrt{\frac{Q(B + 20)}{\rho_{20}} \ln\left(1 + \frac{\theta_f - \theta_i}{B + \theta_i}\right)},$$

где  $Q$  – объемная теплоемкость материала проводника, Дж/(°С·мм<sup>3</sup>);  $B$  – величина обратная температурному коэффициенту сопротивления при 0°С для проводника, °С;  $\rho_{20}$  – удельное электрическое сопротивление проводника при 20 °С, Ом·мм;  $\theta_f$  и  $\theta_i$  – конечная и начальная температура проводника, °С (таблица 1.11). Результаты расчетов минимально допустимого сечения проводников заземляющего устройства представлены в Протоколе 7.

Минимальное сечение заземляющих проводников, подсоединенных к силовому оборудованию, и шин горизонтального заземлителя на ОРУ-220 кВ (с учетом коррозионного износа) составляет 90 мм<sup>2</sup> (сталь круглая диаметром

12 мм). Расчеты показали, что допустимое сечение заземляющих проводников на ОРУ-220 кВ для времени срабатывания основной защиты ( $t = 0,1$ ) составляет  $12 \text{ мм}^2$ . Следовательно, сечение проводников и шин горизонтального заземлителя соответствует требованиям ПУЭ.

Таблица 1.11 – Значения величин  $B$ ,  $Q$  и  $\rho_{20}$  для проводников из различных материалов

Материал	$B, ^\circ\text{C}$	$Q, \text{Дж}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{мм}^3)$	$\rho_{20}, \text{Ом}\cdot\text{мм}$
Сталь	202	0,0038	$138\cdot 10^{-6}$
Медь	234,5	0,00345	$17,241\cdot 10^{-6}$

### 1.9.3.7 Измерение и расчет токов и напряжений промышленной частоты, воздействующих на вторичные цепи

При КЗ на землю потенциал по заземляющему устройству распределяется неравномерно (в месте замыкания имеет место подъем потенциала). Если значение разности потенциалов на ЗУ превысит испытательное напряжение для контрольных кабелей, подходящих к оборудованию или устройствам автоматизированных систем технологического управления (АСТУ), возможно обратное перекрытие изоляции кабелей или устройств. Кроме того, ток КЗ, распределяясь по заземленным оболочкам, броне и экранам кабелей, вызовет повреждение кабелей, если будут превышены допустимые по термической стойкости токи.

При замыкании на землю плотность тока в медном экране контрольного кабеля, проложенного от оборудования до РЩ, не должна превышать  $380 \text{ А/мм}^2$  (допустимое по термической стойкости значение для времени воздействия 0,1 с, соответствующего полному времени отключения КЗ основной защитой) или  $123 \text{ А/мм}^2$  (допустимое по термической стойкости для времени воздействия 0,8 с, соответствующее отключению КЗ УРОВ). Наиболее часто используется экранированный кабель типа КВВГэ, сечение экрана которого  $1 \text{ мм}^2$ . Напряжение, воздействующее на изоляцию кабеля, не должно превышать 2 кВ.

Результаты измерений распределения потенциалов и токов по ЗУ при имитации КЗ на землю приводятся к реальному значению токов КЗ на землю.

Токи в экране контрольного кабеля и напряжения, воздействующие на изоляцию кабеля, рассчитываются по программе «ОРУ-М» для точек, в которых не были проведены измерения, (расчетные точки указываются на исполнительной схеме Приложение 1 – не приведено в пособии).

В результате проведенных измерений и расчетов получено (результаты измерений приведены в Протоколе 8):

- При КЗ на шинах ОРУ-220 кВ токи в экранах контрольных кабелей превышают допустимое значение.
- При КЗ на шинах ОРУ-220 кВ напряжение, воздействующее на изоляцию кабеля, не превышает допустимые значения.

#### **1.9.3.8 Импульсные помехи, вызванные повышением потенциала заземлителя при протекании ВЧ составляющей тока КЗ**

При возникновении КЗ на землю в цепях ВН происходит разряд емкостей кабелей, оборудования и шин на землю, результатом чего является стекание с заземлителя импульсного тока высокой частоты. Часть импульсного напряжения, возникающего в месте ввода тока в заземлитель, при этом передается в цепи, подходящие к оборудованию, и затем на аппаратуру систем вторичной коммутации. Для определения уровней воздействующих на аппаратуру импульсных напряжений моделировалось стекание ВЧ составляющей тока КЗ с заземлителя. Затем проводились измерения импульсного сопротивления оборудования и уровни воздействующих напряжений на аппаратуру систем вторичной коммутации.

Моделирование растекания ВЧ составляющей тока КЗ с заземлителя проводилось при помощи генератора высокочастотных импульсов ГВЧИ-4П. Результаты измерений приводились к реальному значению ВЧ составляющей тока КЗ на подстанции. Уровни импульсных помех в цепях напряжения, тока, управления и сигнализации не должны превышать 2,5 кВ для помехи общего вида и 1 кВ для помехи дифференциального типа при протекании по оборудованию высокочастотной (ВЧ) составляющей тока КЗ (связанной с

разрядом шин и емкостей оборудования). Для ОРУ-220 кВ амплитуда ВЧ составляющей тока принимается равной 2 кА. Результаты измерений и расчетов приведены в Протоколе 9.

Таким образом, уровни импульсных помех в цепях напряжения, тока, сигнализации при КЗ на ОРУ-220 кВ превышают допустимые значения.

### **1.9.3.9 Измерения и расчет импульсных помех при ударах молнии**

Для определения возможности обратного перекрытия с заземлителя на кабели вторичных цепей проводились измерения распределения потенциалов по заземляющему устройству при ударе молнии в молниеприемники с помощью измерительного комплекса ИК-1.

Полученные результаты измерений пересчитываются к параметрам тока молнии в соответствии с рекомендациями МЭК (стандарт 61312-1):

$$I_m = 100 \text{ кА}, \tau_{фр} = 10 \text{ мкс}, t_{и} = 350 \text{ мкс}.$$

Допустимый уровень импульсного напряжения (при котором возникновение обратного перекрытия маловероятно) на заземлителе вблизи кабельного лотка определялся по средней напряженности при которой начинается пробой грунта – 300 кВ/м. При этом принималось, что заземлитель расположен под кабельным лотком на расстоянии не менее 0,5 м. При этих условиях предельно допустимое импульсное напряжение на заземлителе вблизи кабельного лотка составляет 150 кВ. В том случае, если шина с молниеотвода заходит непосредственно в кабельный лоток или на молниеотводе расположен шкаф цепей вторичной коммутации, то воздействие потенциала молниеотвода при ударе молнии будет происходить непосредственно на изоляцию кабелей, импульсная прочность которой принималась равной 20 кВ (в соответствии с ПУЭ).

Расчет импульсных помех при ударах молнии проводился по программе «ОРУ-М». Параметры тока молнии при расчетах распределения потенциала на ЗУ принимают в соответствии с рекомендациями МЭК (стандарт 61312-1). Проводились измерения импульсного сопротивления отдельно стоящих

молниеотводов и определялось соответствие заземляющих устройств молниеотводов требованиям ПУЭ п. 4.2.135, п.4.2.136, 4.2.137.

Импульсные помехи, вызванные ударами молнии в молниеприемники на ОРУ-220 кВ, не превышают допустимый уровень. Импульсные сопротивления отдельно стоящих молниеотводов соответствуют требованиям ПУЭ. Результаты измерений и расчетов отражены в Протоколе 10.

### **1.9.3.10 Заключение**

Проведено комплексное обследование заземляющего устройства ПС «XYZ» для обеспечения электробезопасности персонала и надежной работы первичного оборудования и систем вторичной коммутации.

Выполнены следующие работы:

- Определена трасса прокладки заземлителей и заземляющих проводников (искусственных и естественных), глубины залегания, тип и сечение заземлителей; составлена исполнительная схема заземляющего устройства.
- Проведены измерения удельного сопротивления грунта: зависимости удельного сопротивления грунта от глубины, эквивалентные значения удельного сопротивления грунта приведены к наиболее неблагоприятным климатическим условиям.
- Измерено сопротивление ЗУ.
- Проведен расчет напряжения на ЗУ при коротких замыканиях на землю.
- Измерены сопротивления металlosвязи оборудования с ЗУ.
- Измерены напряжения прикосновения на оборудовании при имитации КЗ на землю, проведены расчеты напряжения прикосновения при заданных токах однофазного КЗ.
- Проведены измерения распределения потенциалов и токов по ЗУ при имитации КЗ на землю, проведен расчет токов и напряжений

промышленной частоты, воздействующих на вторичное оборудование и системы связи.

- Проведены измерения импульсного сопротивления ЗУ оборудования и импульсных помех в цепях вторичной коммутации при имитации ВЧ составляющей тока КЗ.
- Проведены измерения импульсного сопротивления ЗУ молниеотводов, проведены измерения распределения токов и потенциалов по ЗУ при имитации удара молнии в молниеотводы, проведен расчет токов и напряжений, воздействующих на первичное оборудование, вторичное оборудование и системы связи для нормированных параметров тока молнии;
- Определена степень коррозии заземлителей и заземляющих проводников методом выборочного вскрытия грунта.
- Проведены расчеты распределения напряжений и токов при КЗ на землю в первичных цепях (на шинах подстанции и ближнего КЗ) в соответствии с исполнительной схемой ЗУ.
- Разработан проект реконструкции заземляющего устройства.

Выполненные измерения и расчеты представлены в протоколах № 1–10, приведенных в Приложении 2.

В результате проведенных работ обнаружены следующие недостатки:

- Заземляющее устройство ОРУ связано со щитом управления только по металлоконструкциям в кабельном лотке.
- Недостаточная связь трансформаторов со щитом управления.
- На подстанции имеется незаземленное оборудование.
- Имеется оборудование, не связанное с основным заземляющим устройством подстанции.
- Имеется оборудование, связанное с основным заземляющим устройством подстанции последовательно, только через металлоконструкции.

- Имеются обрывы заземляющих проводников.
- Значения напряжений прикосновения на рабочих местах около разъединителей на ОРУ-220 кВ при однофазном КЗ превышают 65 В, что не соответствует требованиям ПУЭ.
- При КЗ на шинах ОРУ-220 кВ токи в экранах контрольных кабелей превышают допустимое значение.
- Импульсные помехи, вызванные повышением потенциала заземлителя при протекании ВЧ составляющей тока КЗ на ОРУ-220 кВ, превышают допустимые значения в цепях напряжения, тока, сигнализации.

Установленные дефекты приведены в Ведомости (Приложении 3).

Таким образом, заземляющее устройство ПС «XYZ» не соответствует требованиям электробезопасности и требованиям электромагнитной совместимости. На основании материалов, приведенных в техническом отчете, выполнен «Рабочий проект по ремонту заземляющего устройства ПС «XYZ» (в Приложение 4).

После выполнения работ по ремонту ЗУ в соответствии с рабочим проектом должно быть проведено послеремонтное обследование. В том случае, если при проведении послеремонтного обследования недостатков не обнаружено, должен быть составлен Паспорт ЗУ. Заземляющее устройство ПС «XYZ» будет соответствовать требованиям электробезопасности и электромагнитной совместимости.

## 1.9.3.11 Приложение 2

## ПРОТОКОЛ № 1 от «хх» уу 20ZZ г.

Наличие и качество металlosвязей оборудования с заземляющим устройством

№	Оборудование	Наличие металlosвязи оборудования с заземлителем					Сопротивление металlosвязи, Ом	Степень коррозии проводников, %	Пригодность к эксплуатации	Дата Следующей проверки
		Кол-во заземляющих проводников	Растекание тока КЗ по элементам заземляющего устройства, %							
			Заземлитель	Кабели	Металло-констр.					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>ОРУ-220 кВ</b>										
1.	ОР-220 ЛЭП 1	2	++	100	-	-	<0,05	До 20	Пригодно	2021 г.
2.	КС-220 ЛЭП 1 «В»	1	+	90	10	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
3.	ЛР-220 ЛЭП 1	2	++	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
4.	ОИ-1 ЛЭП 1 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
5.	ОИ-1 ЛЭП 1 «В»	1	+	100	-	-	<0,05	До 20	Пригодно	2021 г.
6.	ОИ-1 ЛЭП 1 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
7.	МВ-220 ЛЭП 1	3	+++	80	20	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
8.	ОИ-2 ЛЭП 1 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
9.	ОИ-2 ЛЭП 1 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
10.	ШР-220 ЛЭП 1 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
11.	ШР-220 ЛЭП 1 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
12.	ШР-220 ЛЭП 1 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
13.	ШР ТН-2	2	++	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
14.	ТН-2	3	+++	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
15.	ОПН-220 ТН-2 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.

№	Оборудование	Наличие металlosвязи оборудования с заземлителем					Сопротивление металlosвязи, Ом	Степень коррозии проводников, %	Пригодность к эксплуатации	Дата Следующей проверки
		Кол-во заземляющих проводников		Растекание тока КЗ по элементам заземляющего устройства, %						
				Заземлитель	Кабели	Металлоконстр.				
1	2	3		4	5	6	7	8	9	10
16.	ОПН-220 ТН-2 «В»	1	+	100	-	-	<0,05	До 20	Пригодно	2021 г.
17.	ОПН-220 ТН-2 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
18.	ШР ТН1	2	++	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
19.	ТН-1	3	+++	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
20.	ОПН-220 ТН-1 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
21.	ОПН-220 ТН-1 «В»	2	++	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
22.	ОПН-220 ТН-1 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
23.	ШР-220 ЛЭП 2	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
24.	ОИ-3 ЛЭП 2 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
25.	ОИ-3 ЛЭП 2 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
26.	ОИ-3 ЛЭП 2 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
27.	ОИ-2 ЛЭП 2 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
28.	ОИ-2 ЛЭП 2 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
29.	ОИ-2 ЛЭП 2 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
30.	МВ-220 ЛЭП 2	4	+++-	70	30	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
31.	ОИ-1 ЛЭП 2 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
32.	ОИ-1 ЛЭП 2 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
33.	ОИ-1 ЛЭП 2 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
34.	ЛР-220 ЛЭП 2	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.

№	Оборудование	Наличие металlosвязи оборудования с заземлителем					Сопротивление металlosвязи, Ом	Степень коррозии проводников, %	Пригодность к эксплуатации	Дата Следующей проверки
		Кол-во заземляющих проводников		Растекание тока КЗ по элементам заземляющего устройства, %						
				Заземлитель	Кабели	Металлоконстр.				
1	2	3		4	5	6	7	8	9	10
35.	КС-220 ЛЭП 2 «В»	1	+	100	-	-	<0,05	До 20	Пригодно	2021 г.
36.	КС-220 ЛЭП 2 «А»	1	+	95	5	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
37.	ОР-220 ЛЭП 2	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
38.	ОР-220 Т-2	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
39.	ТР-220 Т-2	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
40.	ОИ-1 Т-2 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
41.	ОИ-1 Т-2 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
42.	ОИ-1 Т-2 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
43.	МВ-220 Т-2	4	+++	85	15	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
44.	ШР-220 Т-2 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
45.	ШР-220 Т-2 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
46.	ШР-220 Т-2 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
47.	ОИ-2 Т-2 «В»	1	+	80	20	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
48.	ОИ-2 Т-2 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
49.	ОПН-220 Т-2 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
50.	ОПН-220 Т-2 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
51.	ОПН-220 Т-2 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
52.	ШР-1 ОВ	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
53.	ОИ-3 ОВ «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.

№	Оборудование	Наличие металlosвязи оборудования с заземлителем					Сопротивление металlosвязи, Ом	Степень коррозии проводников, %	Пригодность к эксплуатации	Дата Следующей проверки
		Кол-во заземляющих проводников		Растекание тока КЗ по элементам заземляющего устройства, %						
				Заземлитель	Кабели	Металлоконстр.				
1	2	3		4	5	6	7	8	9	10
54.	ОИ-3 ОВ «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
55.	ШР-2 ОВ «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
56.	ШР-2 ОВ «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
57.	ШР-2 ОВ «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
58.	ОИ-2 ОВ «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
59.	ОИ-2 ОВ «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
60.	ОМВ-220 ОВ	3	++-	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
61.	ОИ-1 ОВ «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
62.	ОИ-1 ОВ «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
63.	ОИ-1 ОВ «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
64.	ОР-220 ОВ	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
65.	ОИ-4 ОВ «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
66.	ОИ-4 ОВ «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
67.	ОИ-4 ОВ «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
68.	СР-220 ОСШ	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
69.	ОИ-1 ОСШ «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
70.	ОИ-1 ОСШ «В»	1	+	70	30	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
71.	СР-2-220 ОСШ «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
72.	СР-2-220 ОСШ «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.

№	Оборудование	Наличие металlosвязи оборудования с заземлителем					Сопротивление металlosвязи, Ом	Степень коррозии проводников, %	Пригодность к эксплуатации	Дата Следующей проверки
		Кол-во заземляющих проводников		Растекание тока КЗ по элементам заземляющего устройства, %						
				Заземлитель	Кабели	Металлоконстр.				
1	2	3		4	5	6	7	8	9	10
73.	СР-2-220 ОСШ «А»	1	+	100	-	-	<0,05	до 20	Пригодно	2021 г.
74.	ОПН-220 Т-1 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
75.	ОПН-220 Т-1 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
76.	ОПН-220 Т-1 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
77.	ШР-220 Т-1	2	++	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
78.	ОИ-3 Т-1 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
79.	ОИ-3 Т-1 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
80.	ОИ-3 Т-1 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
81.	ОИ-2 Т-1 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
82.	ОИ-2 Т-1 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
83.	ОИ-2 Т-1 «С»	1	-	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
84.	МВ-220 Т-1	3	++-	75	25	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
85.	ОИ-1 Т-1 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
86.	ОИ-1 Т-1 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
87.	ОИ-1 Т-1 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
88.	ТР-220 Т-1	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
89.	ОР-220 Т-1	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
90.	ОР-220 ЛЭП 3	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
91.	КС-220 ЛЭП 3 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.

№	Оборудование	Наличие металlosвязи оборудования с заземлителем					Сопротивление металlosвязи, Ом	Степень коррозии проводников, %	Пригодность к эксплуатации	Дата Следующей проверки
		Кол-во заземляющих проводников		Растекание тока КЗ по элементам заземляющего устройства, %						
				Заземлитель	Кабели	Металлоконстр.				
1	2	3		4	5	6	7	8	9	10
92.	ЛР-220 ЛЭП 3	1	+	100	-	-	<0,05	До 20	Пригодно	2021 г.
93.	ОИ-1 ЛЭП 3 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
94.	ОИ-1 ЛЭП 3 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
95.	МВ-220 ЛЭП 3	2	++	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
96.	ОИ-2 ЛЭП 3 «А»	1	+	100	-	-	>0,05		Пригодно	2021 г.
97.	ОИ-2 ЛЭП 3 «В»	1	+	95	-	5	<0,05		Пригодно	2021 г.
98.	ШР-2 ЛЭП 3 «С»	1	+	80	-	20	<0,05		Пригодно	2021 г.
99.	ШР-2 ЛЭП 3 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
100.	ШР-2 ЛЭП 3 «А»	1	-	-	-	-	Не заземлено		Не пригодно	После ремонта
101.	ШР-220 ЛЭП 4	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
102.	ОИ-3 ЛЭП 4 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
103.	ОИ-3 ЛЭП 4 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
104.	ОИ-3 ЛЭП 4 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
105.	ОИ-2 ЛЭП 4 «А»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
106.	ОИ-2 ЛЭП 4 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
107.	ОИ-2 ЛЭП 4 «С»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
108.	МВ-220 ЛЭП 4	3	++-	70	30	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
109.	ОИ-1 ЛЭП 4	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
110.	ОИ-1 ЛЭП 4	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.

№	Оборудование	Наличие металlosвязи оборудования с заземлителем					Сопро-тивление металlo-связи, Ом	Степень коррозии проводников, %	Пригодность к эксплуата-ции	Дата Следу-ющей проверки
		Кол-во заземляющих проводников		Растекание тока КЗ по элементам заземляющего устройства, %						
				Заземлитель	Кабели	Металло-констр.				
1	2	3		4	5	6	7	8	9	10
111.	ОИ-1 ЛЭП 4	1	+	100	-	-	<0,05	До 20	Пригодно	2021 г.
112.	ЛР-220 ЛЭП 4	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
113.	КС-220 ЛЭП 4 «В»	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
114.	ОР-220 ЛЭП 4	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
115.	ПМ-2	2	++	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
116.	Т-1	4	+++--	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
117.	ОИ-1-ШМ-10 Т-1	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
118.	ОИ2-ШМ-10 Т-1	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
119.	ОИ3-ШМ-10 Т1	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
120.	ОИ4-ШМ-10 Т1	1	-	-	-	-	Не заземлено		Не пригодно	После ремонта
121.	Т-2	2	++	90	-	10	<0,05		Пригодно	2021 г.
122.	ОИ-1-ШМ-10 Т-2	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
123.	ОИ-2-ШМ-10 Т-2	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
124.	ОИ-3-ШМ-10 Т-2	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
125.	ОИ-4-ШМ-10 Т-2	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
126.	ОИ-5-ШМ-10 Т-2	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
127.	ОИ-6-ШМ-10 Т-2	1	+	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
128.	ТСН-2	1	+	90	10	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
129.	ТСН-1	1	+	90	10	-	<0,05		Пригодно	2021 г.

№	Оборудование	Наличие металlosвязи оборудования с заземлителем					Сопротивление металlosвязи, Ом	Степень коррозии проводников, %	Пригодность к эксплуатации	Дата Следующей проверки
		Кол-во заземляющих проводников		Растекание тока КЗ по элементам заземляющего устройства, %						
				Заземлитель	Кабели	Металлоконстр.				
1	2	3		4	5	6	7	8	9	10
130.	ПМ-1	3	+++	100	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
131.	Маслохозяйство	-	-	-	-	-	Не заземлено		Не пригодно	После ремонта
<b>ОПУ</b>										
132.	ГЩУ13-23	-	-	-	-	-	<0,05	До 20	Пригодно	2021 г.
133.	ЩИТ П/Т О-4	-	-	-	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
134.	ЩИТ ТСН 5-11	-	-	-	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
135.	РЩУ-24-33	-	-	-	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
136.	РЩУ-35-43	-	-	-	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
137.	РЩУ 44-47	-	-	-	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.
138.	ЗРУ 10кВ	-	-	-	-	-	<0,05		Пригодно	2021 г.

\* Примечание: Качество заземления оборудования считается удовлетворительным, если измеренное сопротивление не превышает:  
 $R_{мсв}(Ом) < 2 (кВ) / I_{кз} (кА)$ , где  $I_{кз}$  – ток КЗ на шинах РУ.

### ПРОТОКОЛ № 2 от «xx» уу 20zz г.

#### Удельное сопротивление грунта

№	Место измерений	Глубина слоя, м	Удельное сопротивление грунта, Ом·м	Примечания
1.	За пределами ПС	0,5	185,7	
2.		1	176,9	
3.		1,5	117,9	
4.		2	72,1	
5.		2,5	50,8	

6.		3	37,8	
7.		3,5	36,1	
8.		4	34,0	
9.		4	47,4	
10.		6	30,0	
11.		8	28,1	
12.		10	32,1	
13.		10	35,7	
14.		15	30,1	
15.		20	32,5	
16.		20	29,6	
17.		30	33,1	
18.		40	40,1	
19.		50	31,1	
20.	На ОРУ-220кВ	0,5	216,1	
21.		1	203,1	
22.		1,5	133,8	
23.		2	77,8	
24.		2,5	53,1	
25.		3	40,8	
26.		3,5	35,0	
27.		4	31,3	
28.		4	28,5	
29.		6	27,4	
30.		8	27,2	
31.		10	26,5	

Эквивалентные значения удельного сопротивления грунта  $\rho$ , приведенные к двухслойной модели, составили:  $\rho_1 = 220 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_2 = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $h = 0,8 \text{ м}$ . Эквивалентные значения удельного сопротивления грунта  $\rho$ , приведенные к двухслойной модели, с учетом промерзания грунта в зимний период составили:  $\rho_1 = 220 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_2 = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $h = 2,4 \text{ м}$ .

**ПРОТОКОЛ № 3 от «xx» уу 20zz г.**  
Сопротивление заземляющего устройства

№	Наименование объекта	Сопротивление ЗУ, Ом	Сопротивление ЗУ без отходящих коммуникаций, Ом	Пригодность к эксплуатации	Дата следующей проверки	Примечания
1.	ОРУ-220 кВ	0,1	0,5	Годен	2021 г.	-

**ПРОТОКОЛ № 4 от «xx» уу 20zz г.**  
Результаты измерений напряжений прикосновения в контрольных точках

№	Оборудование и присоединение		Нормативное значение, В	Измеренное значение, В	Заключение
1	2		3	4	5
ОРУ-220 кВ					
1.	ЛР	ВЛ ЛЭП 1	65	320	Не соответствует требованиям ПУЭ
2.	ОР	Т-2	65	250	Не соответствует требованиям ПУЭ
3.	КС Ф «В»	ВЛ ЛЭП 4	500	410	Соответствует требованиям ПУЭ
4.	МВ	ВЛ ЛЭП 1	500	380	Соответствует требованиям ПУЭ
5.	МВ	Т-1	500	190	Соответствует требованиям ПУЭ
6.	ТН-2		500	190	Соответствует требованиям ПУЭ
7.	ШР	Т-1	65	180	Не соответствует требованиям ПУЭ
8.	Т-2		500	410	Соответствует требованиям ПУЭ
9.	Т-1		500	315	Соответствует требованиям ПУЭ

**ПРОТОКОЛ № 5 от «хх» уу 20zz г.**

Результаты расчетов напряжения на заземляющем устройстве

№	Наименование объекта	Сопротивление ЗУ, Ом	Напряжение на заземляющем устройстве, кВ	Параметры грунта	Соответствие нормативным документам	Примечания
1	ОРУ-220 кВ	0,6	1,8	ρ верхнего слоя – 250 Ом·м, ρ нижнего слоя – 30 Ом·м, толщина верхнего слоя – 2,4 м, с учетом промерзания грунта в зимний период	Соответствует требованиям ПУЭ	При КЗ на ОРУ-220 кВ

**ПРОТОКОЛ № 6 от «хх» уу 20zz г.**

Результаты расчета напряжений прикосновения

№	Наименование объекта	Время срабатывания защиты, с	Наибольшее значение напряжения прикосновения, В	Соответствие нормативным документам
1.	ОРУ-220 кВ (на всем оборудовании)	0,1	450	Соответствует требованиям ПУЭ
2.	ОРУ- 220 кВ (на рабочих местах)	> 1,0	450	Не соответствует требованиям ПУЭ

**ПРОТОКОЛ №7 от «хх» уу 20zz г.**

Результаты расчета термического нагрева заземляющих проводников

№	Наименование объекта	Время срабатывания защиты, с	Минимальное сечение заземляющих проводников на объекте, мм <sup>2</sup> /с учетом коррозии, мм <sup>2</sup>		Допустимое сечение заземляющих проводников, мм <sup>2</sup>		Соответствие нормативным документам
			Заземляющие проводники, подсоединенные к силовому оборудованию	Проводники горизонтального заземлителя	Заземляющие проводники, подсоединенные к силовому оборудованию	Проводники горизонтального заземлителя с учетом растекания в две стороны	
1	ОРУ- 220кВ	0,1	113/90	113/90	12	6	Соответствует требованиям ПУЭ

**ПРОТОКОЛ №8 от «xx» уу 20zz г.**

Токи и напряжения промышленной частоты, воздействующие на вторичное оборудование при КЗ

Трасса	Место приложения воздействия	Напряжение на кабеле, кВ		Токи по экранам кабелей, А		Соответствие нормативным документам
		допустимое	измеренное	допустимое	измеренное	
Оборуд.- ЩУ	ЛР ВЛ ЛЭП 1	2,0	0,7	380	200	Соответствует
Оборуд.- ЩУ	ОР Т-2	2,0	0,6	380	180	Соответствует
Оборуд.- ЩУ	КС Ф «В» ВЛ ЛЭП 4	2,0	1	380	300	Соответствует
Оборуд.- ЩУ	МВ ВЛ ЛЭП 1	2,0	0,8	380	250	Соответствует
Оборуд.- ЩУ	МВ Т-1	2,0	0,2	380	100	Соответствует
Оборуд.- ЩУ	ТН-2	2,0	0,4	380	90	Соответствует
Оборуд.- ЩУ	ШР Т-1	2,0	0,1	380	60	Соответствует
Оборуд.- ЩУ	Т-2	2,0	0,4	380	330	Соответствует
Оборуд.- ЩУ	Т-1	2,0	0,2	380	500	Не соответствует

### ПРОТОКОЛ № 9 от «xx» уу 20zz г.

Импульсные помехи, вызванные подъемом потенциала заземлителя

Вид цепей	Оборудование, откуда приходят цепи к устройству (терминалу)	Имитация ВЧ составляющей тока КЗ				Пересчет к реальным воздействиям		Соответствие 3 степени жесткости по ГОСТ Р 51317.4.12
		Ток генератора, А	Частота колебаний импульса тока, МГц	$Z_{\text{имп.обор}}$ оборудования, Ом	$K_{\text{ПЕРЕД}}$ , о.е.	ВЧ составляющая тока КЗ, кА	Наибольшее напряжение на устройстве (порт подключения кабеля), кВ	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Синфазная помеха (ОРУ-220 кВ)								
ЦН	ТН-1	2,9	0,5	3	4	2	1,5	Соответствует
ЦН	ТН-1	1,4	1	7	8	2	1,6	
ЦН	ТН-2	3,2	0,5	5	2	2	4,0	Не соответствует
ЦН	ТН-2	1,0	1	15	7	2	4,0	
ТЦ	МВ ЛЭП 1	3,4	0,5	2	2	2	2,2	Не соответствует
ТЦ	МВ ЛЭП 1	1,4	1	6	2	2	6,0	
ТЦ	ОМВ	3,1	0,5	3	2	2	2,7	Не соответствует
ТЦ	ОМВ	1,2	1	9	2	2	9,1	
ТЦ	МВ ЛЭП 4	3,1	0,5	2	2	2	1,8	Не соответствует
ТЦ	МВ ЛЭП 4	1,0	1	6	2	2	6,4	
ЦС	Т-1	3,5	0,5	3	5	2	1,4	Не соответствует
ЦС	Т-1	2,4	1	7	5	2	2,7	
ЦС	Т-2	3,3	0,5	4	5	2	1,5	Не соответствует
ЦС	Т-2	0,9	1	16	5	2	6,4	
Противофазная помеха (ОРУ-220 кВ)								
ЦН	ТН-1	2,9	0,5	3	6	2	1,0	Соответствует
ЦН	ТН-1	1,4	1	7	31	2	0,4	
ЦН	ТН-2	3,2	0,5	5	3	2	3,5	Не соответствует
ЦН	ТН-2	1,0	1	15	19	2	1,6	
ТЦ	МВ ЛЭП 1	3,4	0,5	2	6	2	0,7	Не соответствует

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ТЦ	МВ ЛЭП 1	1,4	1	6	6	2	2,0	
ТЦ	ОМВ	3,1	0,5	3	6	2	0,9	Не соответствует
ТЦ	ОМВ	1,2	1	9	6	2	3,0	
ТЦ	МВ ЛЭП 4	3,1	0,5	2	6	2	0,6	Не соответствует
ТЦ	МВ ЛЭП 4	1,0	1	6	6	2	2,1	
ЦС	Т-1	3,5	0,5	3	6,0	2	1,1	Не соответствует
ЦС	Т-1	2,4	1	7	6,0	2	2,2	
ЦС	Т-2	3,3	0,5	4	6,0	2	1,3	Не соответствует
ЦС	Т-2	0,9	1	16	6,0	2	5,3	

### ПРОТОКОЛ № 10 от «xx» уу 20zz г.

Импульсное напряжение, воздействующее на контрольные кабели и оборудование при ударах молнии

№ молние-приемника	Ток молнии, кА	Длительность фронта, мкс	Наибольший потенциал на заземлителе вблизи кабельного канала, кВ	Импульсное сопротивление, Ом	Допустимый уровень, кВ	Заключение	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8
Молниеотводы, стоящие рядом с кабельными каналами ОРУ-220 кВ							
М8	100	10	50	0,5	150	Соответствует	-
М6	100	10	40	0,4	150	Соответствует	-
М2	100	10	30	0,3	150	Соответствует	-
М5	100	10	60	0,6	150	Соответствует	-
Отдельно стоящие молниеотводы							
ПМ1	100	10	-	0,4	-	Соответствует	-
ПМ2	100	10	-	0,7	-	Соответствует	-
М9	100	10	-	2,2	-	Соответствует	-

## 1.9.3.12 Приложение 3

№ пп	Контролируемый параметр	Установленные дефекты	Последствия дефекта
1	Исполнительная схема заземляющего устройства подстанции	Заземляющее устройство ОПУ соединено с ЗУ ОРУ-220 кВ только по металлоконструкциям в кабельном лотке. Заземляющее устройство трансформаторов Т-1, Т-2 не соответствует ПУЭ. Недостаточная связь Т-1, Т-2 со щитом управления.	При КЗ на землю возможно повреждение вторичных кабелей.
2	Качество металlosвязей оборудования ОРУ с заземляющим устройством подстанции	Незаземленное оборудование на ОРУ 220кВ: ШР-2 ЛЭП 3 «А»; ОИ4-ШМ-10 Т1; портал ВЛ ЛЭП 4	Не обеспечена электробезопасность персонала. При КЗ на землю возможно повреждение вторичного оборудования.
3	Напряжение прикосновения на ОРУ-220кВ	Значения напряжений прикосновения на рабочих местах около разъединителей на ОРУ-220 кВ при однофазном КЗ превышают 65 В, что не соответствует требованиям ПУЭ.	Не обеспечена электробезопасность персонала.
4	Воздействие токов и напряжений промышленной частоты на контрольные кабели и вторичное оборудование при замыкании на землю	При КЗ на шинах ОРУ-220 кВ токи в экранах контрольных кабелей превышают допустимое значение.	При КЗ на землю возможно повреждение вторичного оборудования.
5	Импульсные помехи, вызванные повышением потенциала заземлителя при протекании ВЧ составляющей тока КЗ на ОРУ-220 кВ	Значения импульсных помех при КЗ на ОРУ-220 кВ превышают допустимые значения для цепей напряжения, цепей тока, цепей сигнализации..	При КЗ на землю возможно повреждение вторичного оборудования.

## 1.9.3.13 Приложение 4

## Ведомость ссылочных и прилагаемых документов

Обозначение	Наименование
1	2
ПУЭ, изд. 7, перераб. и доп., с изм. 2004 г.	<u>Ссылочные документы</u> Гл. 1.7. Заземление и защитные меры электробезопасности. Гл. 4.2. Распределительные устройства и подстанции напряжением выше 1 кВ. Защита от грозных перенапряжений.

ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ	Электробезопасность. Предельно-допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
ВНИИПроектэлектромонтаж, 1992 г.	"Инструкция по устройству сетей заземления и молниезащите"
МЭК 61312-1 (1995-05)	«Защита от электромагнитного импульса молнии. Часть 1 Основные принципы» <u>Прилагаемые документы</u> Схема «Заземляющее устройство подстанции. Ремонт». Спецификация оборудования, изделий и материалов

### 1.9.3.14 Общие положения

Проект ремонта заземляющего устройства (ЗУ) ПС «XYZ» выполнен на основании материалов, приведенных в Техническом Отчете.

### 1.9.3.15 Критерии проектирования

При проектировании соблюдались требования действующих нормативных документов в части конструктивного исполнения ЗУ, требований электробезопасности и требований электромагнитной совместимости (ЭМС) для микропроцессорной аппаратуры РЗА и контрольных кабелей.

В части электробезопасности проектирование выполнялось на основе требований к напряжению прикосновения (ПУЭ, п.1.7.88, 1.7.91). Определение напряжения прикосновения на рабочих местах проводилось для ОРУ 220 кВ при однофазном КЗ.

Для соблюдения требований ЭМС при проектировании были проведены измерения и расчеты следующих параметров ЗУ:

- максимальное напряжение на ЗУ ОРУ- 220 кВ при однофазном КЗ;
- напряжения, воздействующие на изоляцию контрольных кабелей для ОРУ 220 кВ при однофазном КЗ;
- токи, протекающие по заземленным с обеих сторон экранам контрольных кабелей, для ОРУ-220 кВ при однофазном КЗ;
- уровни импульсных помех в цепях вторичного оборудования и систем связи, связанные с подъемом потенциала заземлителя при однофазном КЗ, двойном замыкании на землю и коммутациях на ОРУ-220 кВ;

- наибольшие значения потенциала на шинах заземлителя вблизи кабельного канала при ударе молнии в молниеотводы на территории подстанции.

В отношении электробезопасности проверялось соответствие следующим требованиям:

- Для всей территории ОРУ –  $U_{\text{прик}} < U_{\text{доп}}, t_{\text{осн}}$ , где  $U_{\text{прик}}$  – напряжение прикосновения на оборудовании при протекании по нему тока однофазного КЗ и тока двойного замыкания на землю,  $U_{\text{доп}}, t_{\text{осн}}$  – допустимое напряжение прикосновения для полного времени отключения КЗ основной защитой  $t_{\text{осн}}$ .
- Для рабочих мест у разъединителей –  $U_{\text{прик}} < U_{\text{доп}}, t_{\text{рез}}$ , где  $U_{\text{прик}}$  – напряжение прикосновения на оборудовании при протекании по нему тока однофазного КЗ и тока двойного замыкания на землю,  $U_{\text{доп}}, t_{\text{рез}}$  – допустимое напряжение прикосновения для полного времени отключения КЗ резервной защитой  $t_{\text{рез}}$ .

В отношении ЭМС проверялось соответствие следующим требованиям:

- Напряжение на заземляющем устройстве при стекании с него тока замыкания на землю не должно, как правило, превышать 10 кВ. При напряжении на заземляющем устройстве более 5 кВ должны быть предусмотрены меры по защите отходящих кабелей связи и телемеханики и по предотвращению выноса опасных потенциалов за пределы электроустановки.
- Разность потенциалов на заземлителе между оборудованием, по которому протекает ток однофазного КЗ и ток двойного замыкания на землю, и РЩ не должна превышать 2 кВ.
- Плотность тока в медном экране контрольного кабеля, по которому протекает ток однофазного КЗ или ток двойного замыкания на землю от оборудования до РЩ не должен превышать  $380 \text{ А/мм}^2$  (допустимое по термической стойкости значение для времени воздействия 0,1 с,

соответствующего полному времени отключения КЗ основной защитой).

- Уровни импульсных помех в цепях напряжения, тока, управления и сигнализации не должен превышать 2,5 кВ для помехи общего вида и 1 кВ для помехи дифференциального типа при протекании по оборудованию высокочастотной (ВЧ) составляющей тока однофазного КЗ и тока двойного замыкания на землю (связанной с разрядом шин и емкостей оборудования). Для ОРУ-220 кВ амплитуда ВЧ составляющей тока принимается равной 2 кА.
- Наибольший потенциал на шинах ЗУ, проходящих вблизи кабельной трассы, при ударе молнии в молниеприемники на территории ПС не должен превышать значение, определяемое по выражению  $U_{\text{молн, макс}} < 300 h$ , где  $U_{\text{молн, макс}}$  – максимально допустимое напряжение на ближайшей к кабельной трассе шине заземлителя, 300 [кВ/м] – допустимая напряженность электрического поля в грунте, не вызывающая искрообразования,  $h, \text{м}$  – расстояние от шины заземлителя до кабельной трассы (с учетом глубины прокладки). В соответствии с рекомендациями МЭК ток молнии принимается равным 100 кА, 10/350 мкс.

### 1.9.3.16 Исходные данные и результаты расчетов

Результаты измерения сопротивления грунта в пересчете к двухслойной модели с учетом промерзания грунта:  $\rho_1 = 220 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $h_1 = 2,4 \text{ м}$ ;  $\rho_2 = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Значение тока однофазного короткого замыкания на шинах 220 кВ составляет в месте КЗ – 3,078 кА. В результате измерений и расчетов было установлено следующее. Для существующей схемы ЗУ не выполнены требования конструктивного исполнения ЗУ.

Требования электробезопасности:

Напряжения прикосновения на рабочих местах разъединителей ОРУ-220 кВ при однофазном КЗ превышают 65 В, что не соответствует требованиям

ПУЭ. (Напряжение прикосновения на рабочих местах у разъединителей 220 кВ не должно превышать 65 В, поскольку возможно их отключение вручную в случае отказа дистанционного управления).

Таким образом, требования электробезопасности для ОРУ-220кВ не выполняются.

Требования ЭМС:

- Наибольшее напряжение на ЗУ при однофазном КЗ на ОРУ-220 кВ составляет 1,8 кВ, что соответствует требованиям ПУЭ.
- Наибольшая разность потенциалов между оборудованием и РЩ при однофазном КЗ на ОРУ-220 кВ составляет 1 кВ, что соответствует требованиям.
- Наибольший ток в экране кабеля типа КВВГэ (сечением  $1\text{мм}^2$ ) при однофазном КЗ на ОРУ-220кВ составляет 500 А, что не соответствует требованиям.
- Уровни импульсных помех в цепях напряжения, в цепях тока, в цепях сигнализации при КЗ на ОРУ-220 кВ превышают допустимые уровни.
- Наибольший потенциал на шине, расположенной рядом с кабельным каналом, при ударе молнии в молниеприемники ОРУ-220 кВ не превышает 150 кВ. Импульсные сопротивления отдельно стоящих молниеотводов удовлетворяют требованиям ПУЭ.

Таким образом, требования ЭМС не выполняются.

Для выполнения требований действующих нормативных документов в части конструктивного исполнения ЗУ, электробезопасности и электромагнитной совместимости должны быть проложены дополнительные шины горизонтального заземлителя в соответствии с прилагаемыми схемами «Заземляющее устройство подстанции. Ремонт». Дополнительно на рабочих местах у разъединителей с ручным приводом на ОРУ-220 кВ установить металлические площадки, соединенные с приводом разъединителя, для нахождения на них оперативного персонала для выполнения переключений,

представленные на чертеже «Площадка для обслуживающего персонала», или выполнить подсыпку щебнем слоем 0,1-0,2 м, или асфальтирование.

Для уменьшения значений импульсных помех необходимо заменить неэкранированные кабели на экранированные с заземлением экранов с двух сторон. После прокладки дополнительных шин горизонтального заземлителя при КЗ на подстанции будут выполняться следующие критерии. Выполняются требования к конструктивному исполнению ЗУ.

Требования электробезопасности:

Напряжения прикосновения на рабочих местах около всех разъединителей ОРУ-220 кВ при однофазном КЗ не превышают 65 В, что соответствует требованиям. Таким образом, требования электробезопасности выполняются.

Требования ЭМС:

- Наибольшее напряжение на ЗУ при однофазном КЗ на шинах ОРУ-220 кВ не превышает 0,9 кВ, что соответствует требованиям ПУЭ. Сопротивление заземляющего устройства подстанции составляет 0,3 Ом.
- Наибольшая разность потенциалов между оборудованием и РЩ при КЗ не превышает 0,1 кВ, что соответствует требованиям.
- Наибольший ток в экране кабеля (сечением  $1\text{мм}^2$ ) не превышает 380 А, что соответствует требованиям.
- Уровни импульсных помех в цепях РЗА при КЗ на ОРУ-220 кВ не превышают допустимого уровня.
- Наибольший потенциал на шине, расположенной рядом с кабельным каналом, при ударе молнии в молниеотводы не превышает 150 кВ. Импульсные сопротивления отдельно стоящих молниеотводов удовлетворяют требованиям ПУЭ.

Таким образом, требования ЭМС выполняются.

### **1.9.3.17 Требования к выполнению ремонтных работ**

Существующее на ПС заземляющее устройство не удовлетворяет

требованиям электробезопасности и ЭМС и требует ремонта.

При выполнении ремонтно-восстановительных работ следует руководствоваться следующими положениями:

- Работы выполнить в соответствии с требованиями ПУЭ и "Инструкции по устройству сетей заземления и молниезащите".
- В качестве заземлителя использовать стальную полосу размером 40×4 мм<sup>2</sup>.
- Переходы под проезжей частью (дороги, железнодорожные пути) допускается выполнять прутком диаметром 16-18 мм.
- Глубина залегания вновь прокладываемых горизонтальных шин должна быть 0,5 – 0,7м.
- Сварка полос, либо полосы и прутка заземлителя должна производиться внахлест с проваркой всего места соединения.
- Пересечения шин заземлителя должны быть проварены.
- Места сварки покрыть битумным лаком.
- В местах выхода шины из грунта место соединения необходимо гидроизолировать. Верхняя точка наложения изоляции должна находиться на 10-15 см выше поверхности грунта, нижняя - на уровне 0,2 м ниже поверхности грунта.
- При переходе шин через кабельные каналы место перехода необходимо гидроизолировать.
- Засыпку траншей производить после составления Акта скрытых работ.
- Траншеи засыпать естественным грунтом с последующей трамбовкой.
- Проверить коррозионный износ заземляющих проводников всего оборудования реконструируемых ОРУ и в случае обнаружения коррозионного износа свыше 50% - заменить спуски на новые.
- На рабочих местах около разъединителей должны быть выполнены металлические площадки, соединенные с приводом разъединителя, для нахождения на них персонала при выполнении переключений в местах

разъединителей ОРУ-220 кВ, где отсутствуют кабельные каналы и короба, или выполнена подсыпка щебнем слоем 0,1-0,2 м или асфальтирование.

После проведения ремонта в соответствии с прилагаемыми схемами «Заземляющее устройство подстанции. Ремонт». ЗУ подстанции «XYZ» будет удовлетворять требованиям электробезопасности и электромагнитной совместимости. По окончании ремонтных работ составляется Паспорт заземляющего устройства подстанции. Спецификация использованных материалов, изделий и оборудования приведена в таблице 1.12.

Таблица 1.12 – Спецификация оборудования, изделий и материалов

Наименование и техническая характеристика оборудования и материалов. Завод-изготовитель (для имп. оборудования - страна, фирма)	Тип, марка оборудования, обозначение документа и опросного листа	Единица измерения	Количество
1	2	3	4
Стальная полоса 40×4 мм <sup>2</sup> горизонтальный заземлитель	ГОСТ 103-76	м	1250
Арматура, диаметр 16 мм		м	50
Провод ПВЗ 1х25		м	
Для металлических площадок			
Стальная полоса 40х4 мм <sup>2</sup> для соединения корпуса привода разъединителя с площадкой (ОРУ-220 кВ)		м	65
Сталь угловая 25х25х4 (ОРУ-220 кВ)		м	110
Арматура, диаметр 10мм (ОРУ-220 кВ)		м	260

Количество металлических площадок для рабочих мест разъединителей ОРУ-220 кВ (разъединители) – 25 ед. (При выполнении около рабочих мест подсыпки щебнем - необходимо 6 м<sup>3</sup> щебня)

### 1.10 Восстановление системы заземления подстанции и последующая диагностика её заземляющего устройства

Цель – работы освещение вопросов восстановления системы заземления подстанции и последующей диагностики её заземляющего устройства.

В предыдущем разделе приведен отчет о комплексной проверке ЗУ ПС

«XYZ». Было показано частичное невыполнение требований по ЭМС и электробезопасности, а также предложены мероприятия по устранению данных замечаний. В данном разделе приведен технический отчет (с незначительными сокращениями) по восстановлению системы заземления на подстанции «XYZ». Как и в предыдущем разделе, для общности изложения приведено оригинальное название разделов.

### **1.10.1 Введение**

В соответствии с Техническим заданием к Договору подряда №ААА от cc.dd.ee, на основании Технического отчета по комплексному обследованию заземляющего устройства (ЗУ) ПС «XYZ» от xx.yy.zz г (см. предыдущий раздел пособия), была разработана рабочая документация на восстановление системы заземления данной ПС и произведен ремонт с последующей диагностикой ЗУ.

Настоящий отчет содержит результаты комплексного послеремонтного обследования: ведомость устраненных дефектов (Приложение 1) и протоколы измерений (Приложение 2 – не приведено в пособии).

Работы по комплексному обследованию ЗУ ПС выполнялись в соответствии с требованиями:

- Действующих “Правил устройства электроустановок”, ПУЭ, изд. 7, переработанное и дополненное, с изменениями. 2004 г. Глава 1.7. Заземление и защитные меры электробезопасности. Глава 4.2. Распределительные устройства и подстанции напряжением выше 1 кВ. Защита от грозовых перенапряжений.
- РД153-34.0-20.525-00. «Методические указания по проверке состояния заземляющих устройств электроустановок».
- РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования».
- СО 34.35.311.2004 «Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях».

- ГОСТов, стандартов МЭК и рекомендациями другой нормативной и технической документации.

При проведении комплексного обследования заземляющего устройства выполнялись следующие виды работ:

- составление исполнительной схемы заземляющего устройства;
- измерение сопротивления растеканию ЗУ;
- измерение сопротивлений металlosвязи оборудования с ЗУ;
- измерение напряжения прикосновения на оборудовании;
- измерения распределения токов и потенциалов по ЗУ при имитации КЗ на землю;
- измерение импульсных сопротивлений оборудования при имитации КЗ на землю;
- измерения импульсного сопротивления ЗУ молниеотводов, распределения токов и потенциалов по ЗУ при имитации удара молнии в молниеотводы;
- регистрация импульсных помех в цепях РЗА при имитации ВЧ составляющей тока КЗ.

Кроме того, были произведены расчеты:

- расчет напряжения на ЗУ при коротких замыканиях на землю;
- расчет токов и напряжений, воздействующих на первичное оборудование, вторичное оборудование и системы связи для нормированных параметров тока молнии;
- проведены расчеты токов и напряжений при КЗ на землю в первичных цепях (на шинах подстанции и ближнего КЗ) в соответствии с исполнительной схемой ЗУ.

Рассматривались следующие аварийные ситуации на объекте, приводящие к возникновению опасных производственных факторов для оперативного персонала и неправильной работе вторичного оборудования и систем связи:

- однофазные замыкания на землю на ОРУ;

- удары молнии в молниеотводы и молниеприемники подстанции.

С точки зрения электробезопасности, определялась возможность появления, при аварийных режимах, напряжений прикосновения, превышающих допустимые значения в соответствии с ПУЭ п.1.7.91 и ГОСТ 12.1.038-82. Критерием электробезопасности принималось условие обеспечения значений напряжений прикосновения к любому оборудованию ниже предельно допустимых значений в соответствии с ГОСТ 12.1.038-82.

Для оценки технического состояния заземляющего устройства проверялись следующие параметры:

- коррозионное состояние заземляющих проводников и заземлителей;
- соответствие вновь укладываемых заземлителей требованиям по термической стойкости;
- конструктивное выполнение.

В качестве воздействий, приводящих к повреждению и (или) неправильной работе первичного оборудования, вторичного оборудования и систем связи, рассматривались:

- воздействие при КЗ токов и напряжений промышленной частоты на кабели вторичных цепей;
- воздействие на аппаратуру импульсных напряжений, вызванных повышением потенциала заземлителя при протекании ВЧ составляющей тока однофазного КЗ;
- воздействие на аппаратуру импульсных напряжений, вызванных ударами молнии.

Для проведения расчетов заземляющих устройств использовалась программа «ОРУ-М» версия 2.1.17 (© РАО «ЕЭС России», Московский энергетический институт (ТУ), ООО «НПФ Электротехника: наука и практика», 2002 г. Роспатент рег. № 2002611768 от 15.10.02).

### **1.10.2 Характеристика объекта**

Подстанция «XYZ» представляет собой подстанцию открытого типа

220/10кВ. От подстанции отходят 4 линии 220 кВ. На территории подстанции расположены следующие здания и сооружения: ОПУ, в котором расположены РЩ ЗРУ-10 кВ. Схема распреедустройства 220 кВ – секционированная система шин с обходной. Значение тока однофазного короткого замыкания на шинах 220 кВ составляет в месте КЗ – 3,078 кА. Время срабатывания защиты при замыкании на землю на ОРУ – 220кВ составляет:

- основная защита – 0,1 сек.;
- резервная защита – более 1 сек;

Прокладка существующих кабелей вторичных цепей от оборудования ОРУ – 220 кВ до РЩ выполнена в кабельных лотках. Молниезащита объекта осуществляется при помощи молниеприемников, установленных на прожекторных мачтах, молниеприемников, установленных на порталах и отдельно стоящих молниеотводов.

### 1.10.3 Средства измерения и программное обеспечение

Перечень испытательного оборудования и средств измерений, использованных при проведении испытаний, приведен в таблице 1.13.

Таблица 1.13 – Испытательное оборудование и средства измерений

№ п.п.	Наименование испытательного (измерительного) оборудования, тип	Наименование испытаний или измеряемых характеристик
1	Осциллограф цифровой Tektronix TPS 2024	
2	Генератор импульсных токов ГИТ-5. Основные технические характеристики: зарядное напряжение – 4500 В; накопительная емкость – 1,0 мкФ; амплитуда импульса тока в ЗУ – до 150 А; форма импульса тока в ЗУ – 1,2/50 мкс; периодичность следования импульсов 50 с.	Измерение сопротивления заземления МО при импульсном токе, измерение уровня ВЧ помех во вторичных цепях
3	Трассопоисковый комплекс RD 4000	Определение исполнительной схемы заземления
4	Лазерный дальномер Disto special 5	Измерение расстояний и габаритных размеров
5	Светодальномер лазерный Nikon Laser 550A	Измерение высот
6	Измеритель напряжения прикосновения ОНП-1	Измерение сопротивления электрической связи заземляемых объектов, напряжения прикосновения
7	Измерительный комплекс ИКП-1	Имитация ВЧ составляющей тока

		КЗ при измерении импульсных сопротивлений оборудования и импульсных помех во вторичных цепях; измерение распределения токов и потенциалов по ЗУ при замыкании на землю
8	Измерительный комплекс КДЗ-1	Измерение распределения потенциалов по ЗУ при имитации тока замыкания на землю

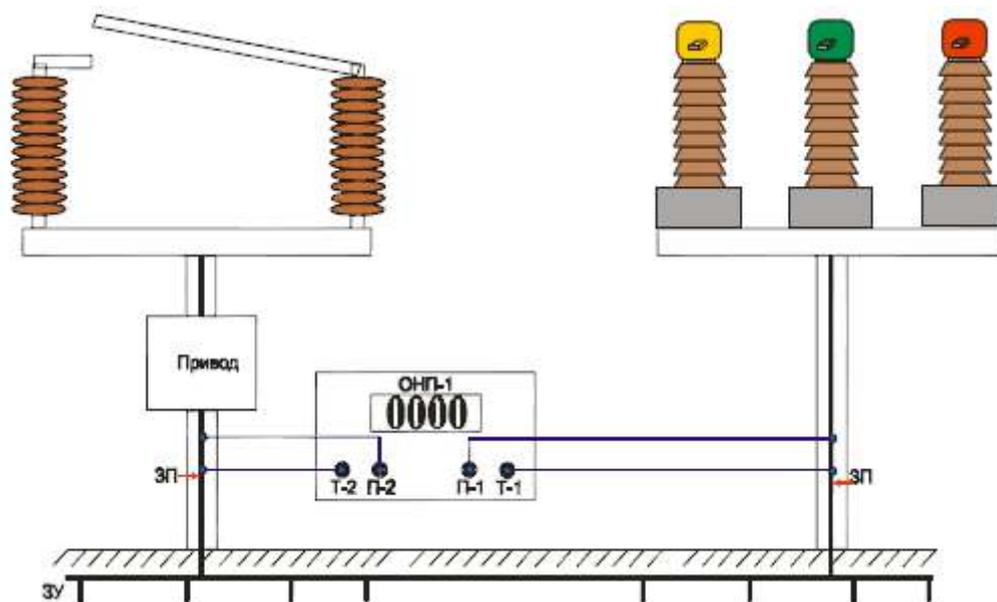
#### **1.10.4 Методика проведения обследований**

##### **1.10.4.1 Составление исполнительной схемы заземляющего устройства**

С помощью трассопоисковых приборов КДЗ-1, RD4000, по методике и рекомендациям [Методические указания по проверке состояния ЗУ электроустановок при помощи измерительного комплекса для диагностики качества контуров заземления КДЗ-1. М.: ООО «НПФ ЭЛНАП», 2002], была составлена исполнительная (реальная) схема заземляющего устройства подстанции. Ранее обнаруженные дефекты конструктивного исполнения заземляющего устройства подстанции устранены. Исполнительная схема приложена к Паспорту ЗУ.

##### **1.10.4.2 Сопротивление связи заземлителя с заземляющим устройством**

Измерение сопротивления металlosвязи и проверка качества контактных соединений осуществляется следующим образом: клеммы Т1 и П1 прибора ОНП-1 присоединяются к заземляющему устройству объекта при помощи измерительных проводов и струбцин, а клеммы Т2 и П2 к заземляющим проводникам оборудования объекта в соответствии с рисунком 1.67. Опыт обследования показывает, что сопротивление 0,05–0,1 Ом может быть достигнуто при присоединении оборудования оболочками кабелей и болтовыми соединениями низкого качества, поэтому качество металlosвязи рекомендуется считать удовлетворительным, если величина сопротивления не превышает 0,05 Ом.



ЗП – заземляющий проводник, ЗУ – заземляющие проводники

Рисунок 1.67 – Схема измерения сопротивления металловязи

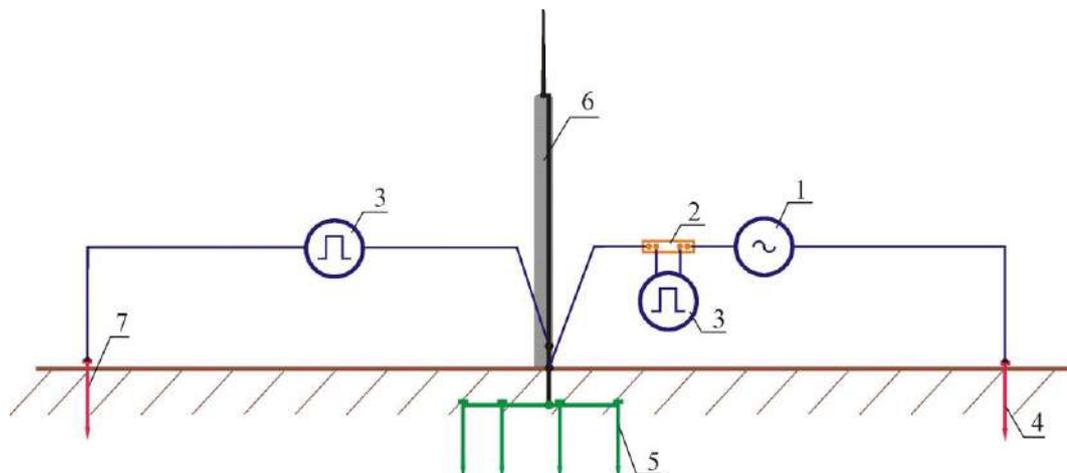
#### 1.10.4.3 Измерение импульсного сопротивления заземлителя

Измерение сопротивления заземлителей ( $Z_{\text{имп}}$ ) проводится с целью оценки эффективности этих заземлителей по растеканию тока молнии. Измерения осуществляются по двухлучевой схеме согласно РД 153-34.0-20.525-00, с помощью генератора импульсных токов и цифрового осциллографа. Схема измерений показана на рисунке 1.68.

Выносной токовый электрод забивался в грунт на расстоянии 50 м от заземлителя. Потенциальный электрод выносился также на 50 м в другую сторону. При этом угол между токовой и потенциальными цепями составлял 300. Далее, производилось измерение амплитуды импульсного тока с шунта и измерение максимальной амплитуды импульса напряжения на потенциальном электроде при протекании по токовой цепи имитационного импульса грозового тока.

По требованиям ПУЭ п.4.2.137 сопротивление молниеотводов имеющих обособленный заземлитель должно быть не более 80 Ом. Величина импульсных сопротивлений для молниеприёмников, установленных на порталах или металлоконструкциях соединённых с общим контуром заземления ПС, нормами не определена, однако она учитывалась при расчётах по оценке

уровня наведенных помех.



1 - генератор импульсного тока; 2 - токовый шунт; 3 - осциллограф; 4 - токовый электрод;  
5 - ЗУ молниеприемника; 6 - молниеприемник; 7 - потенциальный электрод

Рисунок 1.68 – Схема измерения импульсного сопротивления заземлителя

Импульсное сопротивление молниеприемника определяется по формуле:

$$Z_{\text{ИЗМ}} = \frac{U_{\text{ИЗМ}}}{U_{\text{ИЗМ.Ш}}} R_{\text{Ш}},$$

где  $U_{\text{ИЗМ}}$  – амплитуда импульсного напряжения,  $U_{\text{ИЗМ.Ш}}$  – амплитуда напряжения на шунте,  $R_{\text{Ш}}$  – сопротивление шунта.

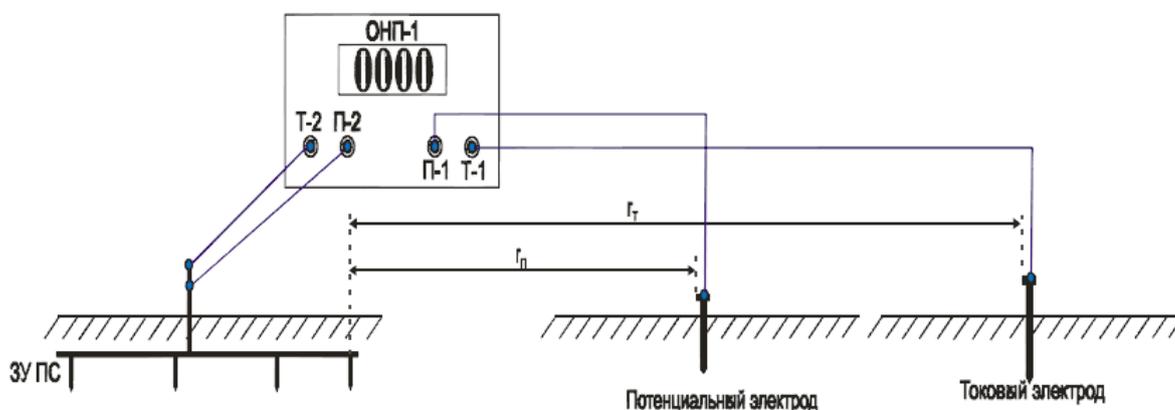
### 1.10.5 Удельное сопротивление грунта

Поскольку произведённые ремонтно-восстановительные работы не оказывают влияния на электрические характеристики грунта, в настоящем отчете приняты результаты измерений, выполненных при обследовании (см. предыдущий раздел).

### 1.10.6 Сопротивление заземляющего устройства подстанции

Измерение сопротивления заземляющего устройства ( $R_{\text{ЗУ}}$ ) прибором ОНП-1 в соответствии с рекомендациями РД 153-34.0-20.525-00 п.2.4 по однолучевой схеме рисунке 1.69. Для измерения клеммы Т1, П1 прибора ОНП-1 подключались к заземляющему проводнику заземляющего устройства при помощи струбцин. Выносной токовый электрод забивался в грунт на глубину

1,0 м на расстоянии 3-х наибольших диагоналей заземляющего устройства от территории ПС. Токовая клемма Т2 присоединялась к выносному токовому электроду проводом соответствующей длины. Производился контроль величины суммарного сопротивления токовой цепи (сопротивлений проводов, электродов и грунта на участке измерения). Величина сопротивления токовой цепи не должна превышать 3 кОм, для того чтобы прибор не выходил за пределы своей погрешности. Расстояние от заземляющего устройства до токового электрода разбивалось на 10 равных промежутков на границах которых поочередно забивался выносной потенциальный электрод на глубину 70–80 см, для создания точки измерения. В каждой точке измерения выносной потенциальный электрод подключался к клемме П2 ОНП-1 при помощи провода, далее выполняется измерение сопротивления в данной точке. Результаты измерений заносились в таблицу измерений. По полученным точкам строился график зависимости измеренного сопротивления от расстояния потенциального электрода до токового. В соответствии с РД 153-34.0-20.525-00, если кривая монотонно возрастает и имеет в средней части горизонтальный участок и разница сопротивлений, измеренных при  $r_{п} = 0,4 \times r_{т}$  и  $r_{п} = 0,6 \times r_{т}$  не превышает 10%, то за истинное значение сопротивления принимается значение при  $r_{п} = 0,5 \times r_{т}$ . Так как измерения проводились в период наибольшего высыхания грунта, сезонный коэффициент не учитывался.



ЗУ ПС – заземляющие устройство подстанции;  $r_{т}$  – расстояние до токового электрода;  $r_{п}$  – расстояние до потенциального электрода

Рисунок 1.69 – Схема измерения сопротивления заземляющего устройства по однолучевой схеме

Результаты измерений представлены в Протоколе № 3 Приложения 2.

В результате измерений получено значение сопротивления растеканию  $R_{3У} = 0,250$  Ом. Расчеты сопротивления ЗУ и напряжения на ЗУ проводились с помощью программы «ОРУ-М» для двухслойной модели грунта. При проведении расчетов составлялась схема замещения исполнительной схемы ЗУ. Результаты измерений сопротивления ЗУ использовались для тестирования расчетной схемы. При полученных параметрах грунта расчетное значение сопротивления заземляющего устройства подстанции не превысит 0,65 Ом.

Расчетное значение напряжения на заземляющем устройстве при замыкании на землю не превышает 770 В.

### 1.10.7 Измерение напряжения прикосновения

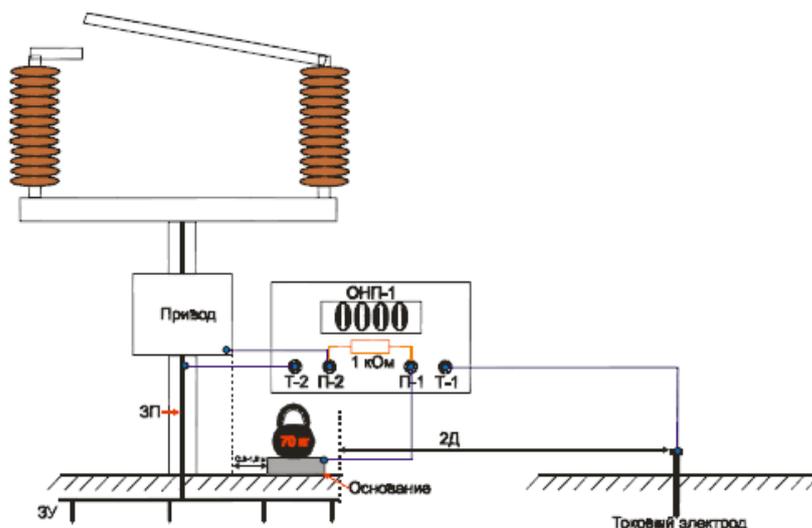
Оценка напряжения прикосновения  $U_{ПР}$  производилась косвенным методом, с использованием расчетных значений токов короткого замыкания обследуемой электроустановки, измеренного сопротивления и предельно допустимых уровней напряжений прикосновения и токов согласно РД 153-34.0-20.525-00.  $U_{ПР}$  определялось по выражению:

$$U_{ПР} = \frac{I_3 R_{ПР}^{ИЗМ} R_{Ч}}{R_{Ч} + R_{ОСН}},$$

где  $I_3$  – значение тока замыкания на землю в месте измерения;  $R_{ПР}^{ИЗМ}$  – сопротивление, измеренное прибором;  $R_{Ч}$  – сопротивление тела человека;  $R_{ОСН}$  – минимальное из всех измеренных на объекте значений сопротивления основания.

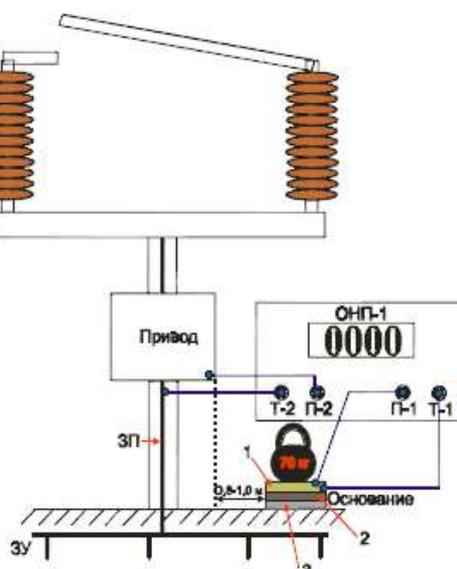
Измерение сопротивления прикосновения производилось по схеме рисунка 1.70. Клемма П2 присоединялась к приводу разъединителя, Т2 к заземляющему проводнику разъединителя. Клемма П1 присоединялась к пластине, имитирующей стопы ног человека, которая располагалась на расстоянии от привода разъединителя в 0,8–1,0 м, Т1 к выносному токовому электроду, расположенному на расстоянии двух наибольших диагоналей (2Д) от заземляющего устройства ПС. Между клеммами П1 и П2 включалось

сопротивление номиналом 1 кОм для имитации электрического сопротивления тела человека. Пластина, имитирующая стопы ног человека, была выполнена из доски размером 25×25 см, поролона, медной сетки. Основание под пластиной выравнивалось и увлажнялось 250 мл воды. Давление на пластину было около 70 кгс. Измерение сопротивления основания выполнялось согласно рисунка 1.71.



ЗП – заземляющий проводник; ЗУ – заземляющее устройство

Рисунок 1.70 – Схема измерения сопротивления прикосновения на рабочем месте



ЗП – заземляющий проводник; ЗУ – заземляющее устройство;

1 – доска; 2 – поролон; 3 – медная сетка

Рисунок 1.71 – Схема измерения сопротивления основания

В соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.038-82, значения напряжения прикосновения для режимов однофазного КЗ не должны превышать 65 В (для времени срабатывания резервной защиты более 1 сек.) для рабочих мест, где при производстве оперативных переключений могут возникнуть замыкания на конструкции, доступные для прикосновения производящему переключения персоналу. При этом на остальных местах значения напряжения прикосновения не должны превышать 500 В (для времени срабатывания основной защиты 0,1 сек.). Результаты проверки значений напряжения прикосновения после ремонта ЗУ представлены в Протоколе № 4 Приложения 2.

Проведенные измерения показали, что значения напряжения прикосновения на ПС соответствуют требованиям руководящих документов. Расчеты значений напряжения прикосновения с учетом промерзания грунта в зимний период проводились с помощью программы ОРУ-М для двухслойной модели грунта по составленной схеме замещения исполнительной схемы ЗУ. Расчеты проводились для режимов однофазного замыкания на шинах ОРУ всех классов напряжения. Результаты расчетов значений напряжений прикосновения представлены в Протоколе № 7 Приложения 2.

Проведенные расчеты показали, что при однофазном замыкании на шинах ОРУ – 220 кВ значения напряжений прикосновения на оборудовании не превышают 500 В, что соответствует требованиям. Значения напряжений прикосновения на рабочих местах (на приводах разъединителей) на ОРУ – 220 кВ при однофазном замыкании на землю не превышают 65 В, что соответствует требованиям.

#### **1.10.8 Термическая стойкость заземляющих проводников**

При ремонтно-восстановительных работах использовались сталь полосовая 40×5 мм сечением 200 мм<sup>2</sup> и сталь круглая диаметром 18 мм сечением 254 мм<sup>2</sup>. Минимальное сечение существующих заземляющих проводников, и шин горизонтального заземлителя на ОРУ – 220 кВ составило 113 мм<sup>2</sup> (сталь круглая диаметром 12 мм).

Проведенные расчеты показали, что допустимое сечение заземляющих проводников на ОРУ – 220 кВ для времени срабатывания основной защиты ( $t = 0,1$ ) составляет  $12 \text{ мм}^2$ . Следовательно, сечение как существовавших, так и вновь смонтированных заземляющих проводников и горизонтальных заземлителей удовлетворяют требованиям по термической стойкости.

#### **1.10.9 Измерение и расчет токов и напряжений промышленной частоты, воздействующих на вторичные цепи**

При замыкании на землю потенциалы по заземляющему устройству распределяются неравномерно. Если значение разности потенциалов на ЗУ превысит испытательное напряжение для контрольных кабелей, подходящих к оборудованию или устройствам автоматизированных систем технологического управления (АСТУ), возможно перекрытие изоляции кабелей или устройств. Кроме того, ток замыкания, протекая по заземленным оболочкам, броне и экранам кабелей, может вызвать их повреждение.

При замыкании на землю плотность тока в медном экране контрольного кабеля, проложенного от оборудования до РЩ, не должна превышать  $380 \text{ А/мм}^2$  для времени воздействия  $0,1 \text{ с}$  и  $123 \text{ А/мм}^2$  для времени воздействия  $0,8 \text{ с}$ . Наиболее часто используется экранированный кабель типа КВВГэ, сечение экрана которого  $1 \text{ мм}^2$ , соответственно ток в оболочке не должен превысить уровень  $380$  и  $123 \text{ А}$  соответственно. Напряжение, воздействующее на изоляцию кабеля, не должно превышать  $2 \text{ кВ}$ . Результаты измерений распределения потенциалов и токов по ЗУ при имитации КЗ на землю приводятся к реальному значению токов КЗ на землю.

В результате проведенных измерений и расчетов получено:

1. При КЗ на шинах ОРУ – 220 кВ токи в экранах контрольных кабелей не превышают допустимое значение.

2. При КЗ на шинах ОРУ – 220 кВ напряжение, воздействующее на изоляцию кабеля не превышает допустимые значения.

Результаты измерений приведены в Протоколе № 8.

### **1.10.10 Импульсные помехи, вызванные ВЧ составляющей тока замыкания на землю**

При возникновении замыкания на землю, при прерывистом горении высоковольтной дуги, в цепях ВН происходит разряд емкостей кабелей, оборудования и шин на землю, результатом чего является стекание с заземлителя импульсного тока высокой частоты. Часть импульсного напряжения, возникающего в месте ввода тока в заземлитель, при этом передается в цепи, подходящие к оборудованию, а затем на аппаратуру систем вторичной коммутации. Для определения уровней воздействующих на аппаратуру импульсных напряжений моделировалось стекание ВЧ составляющей тока КЗ с заземлителя. Проводилось измерение импульсного сопротивления оборудования и уровней воздействующих напряжений на аппаратуру систем вторичной коммутации согласно СО 34.35.311-2004. Моделирование растекания ВЧ составляющей тока КЗ с заземлителя проводилось при помощи генератора высокочастотных импульсов ГВЧИ-4П. Результаты измерений приводились к реальным значениям ВЧ составляющей тока КЗ на подстанции. Уровни импульсных помех в цепях напряжения, тока и управления не должны превышать 2,5 кВ для помехи провод – земля и 1 кВ для помехи провод – провод. Для ОРУ – 220 кВ амплитуда ВЧ составляющей тока принимается равной 2,0 кА.

Результаты измерений и расчетов приведены в Протоколе № 9. Значения импульсных помех при замыкании на землю на ОРУ – 220 кВ не превышают допустимые значения для цепей тока, напряжения и цепей управления.

### **1.10.11 Измерение и расчет импульсных помех при ударах молнии**

Для определения возможности обратного перекрытия с заземлителя на кабели вторичных цепей проводились измерения распределения потенциалов по заземляющему устройству при ударе молнии в молниеприемники с помощью имитационного генератора ГИТ-5. Полученные результаты измерений пересчитываются к параметрам тока молнии в соответствии с

рекомендациями МЭК (стандарт 61312-1):

$$I_m = 100 \text{ кА}, t_{\text{фр}} = 10 \text{ мкс}, t_{\text{и}} = 350 \text{ мкс}.$$

Допустимый уровень импульсного напряжения (при котором возникновение перекрытия маловероятно) на заземлителе вблизи кабельного лотка определялся по средней напряженности при которой начинается пробой грунта – 300 кВ/м. При этом принималось, что заземлитель расположен под кабельным лотком на расстоянии не менее 0,5м. При этих условиях предельно допустимое импульсное напряжение на заземлителе вблизи кабельного лотка составляет 150 кВ. В том случае, если шина с молниеотвода заходит непосредственно в кабельный лоток или на молниеотводе расположен шкаф цепей вторичной коммутации, то воздействие потенциала молниеотвода при ударе молнии будет происходить непосредственно на изоляцию кабелей, импульсная прочность которой принималась равной 20 кВ.

Проводились измерения импульсного сопротивления отдельно стоящих молниеотводов и определялось соответствие заземляющих устройств молниеотводов требованиям ПУЭ п. 4.2.135, п. 4.2.136, 4.2.137. Импульсные сопротивления отдельно стоящих молниеотводов соответствуют требованиям ПУЭ. Результаты измерений и расчетов отражены в Протоколе № 10. Расчет импульсных помех при ударах молнии проводился в программе «ОРУ-М». Параметры тока молнии при расчетах распределения потенциала на ЗУ принимают в соответствии с рекомендациями МЭК (стандарт 61312-1). Импульсные помехи, вызванные ударами молнии в молниеприемники на ОРУ – 220 кВ, не превышают допустимый уровень.

### **1.10.12 Заключение**

Проведено комплексное послеремонтное обследование заземляющего устройства ПС 220 кВ «XYZ» для оценки качества и эффективности ремонтно-восстановительных работ. В рамках комплексного обследования выполнены следующие работы:

1. Составлена исполнительная схема заземляющего устройства.

2. Измерено сопротивление ЗУ.
3. Проведены измерения и расчет напряжения на ЗУ при замыканиях на землю.
4. Измерены сопротивления металlosвязи оборудования с ЗУ.
5. Измерены напряжения прикосновения на оборудовании при имитации КЗ на землю.
6. Проведены расчеты напряжения прикосновения при заданных токах однофазного замыкания.
7. Проведены измерения распределения потенциалов и токов по ЗУ при имитации замыкания на землю, проведен расчет токов и напряжений промышленной частоты, воздействующих на вторичное оборудование и системы связи.
8. Проведены измерения импульсного сопротивления ЗУ оборудования и импульсных помех в цепях вторичной коммутации при имитации ВЧ составляющей тока КЗ.
9. Проведены измерения импульсного сопротивления ЗУ молниеотводов, проведены измерения распределения токов и потенциалов по ЗУ при имитации удара молнии в молниеотводы, проведен расчет токов и напряжений, воздействующих на первичное оборудование, вторичное оборудование и системы связи для нормированных параметров тока молнии.
10. Определена степень коррозии заземлителей и заземляющих проводников методом выборочного вскрытия грунта.
11. Составлен паспорт заземляющего устройства.  
Сведения об устранении дефектов, обнаруженных при обследовании, приведены в Ведомости устраненных дефектов в Приложении 1.  
Выполненные измерения и расчеты представлены в протоколах №№ 1-10, приведенных в Приложении 2 (не приведено в пособии).  
По результатам послеремонтного обследования недостатков в ЗУ ПС 220 кВ «XYZ» не обнаружено. Заземляющее устройство подстанции соответствует требованиям электробезопасности и требованиям

электромагнитной совместимости.

### 1.10.13 Приложение 1

Ведомость устраненных дефектов ЗУ на ПС 220 кВ «XYZ».

№ пп	Контролируемый параметр	Установленные дефекты	Сведения об устранении дефектов
1	Исполнительная схема заземляющего устройства подстанции	Заземляющее устройство ОПУ соединено с ЗУ ОРУ-220 кВ только по металлоконструкциям в кабельном лотке. Заземляющее устройство трансформаторов Т-1, Т-2 не соответствует ПУЭ. Недостаточная связь Т-1, Т-2 со щитом управления.	Смонтированы дополнительные горизонтальные заземлители, восстанавливающие связи между ОРУ, ОПУ и автотрансформаторами.
2	Качество металлосвязей оборудования ОРУ с заземляющим устройством подстанции	Незаземленное оборудование на ОРУ 220кВ: ШР-2 ЛЭП 3 «А»; ОИ4-ШМ-10 Т1; портал ВЛ РЧ-224	Восстановлено соединение с контуром ЗУ.
3	Напряжение прикосновения на ОРУ-220кВ	Значения напряжений прикосновения на рабочих местах около разъединителей на ОРУ-220 кВ при однофазном КЗ превышают 65 В, что не соответствует требованиям ПУЭ.	Усилена сетка контура ЗУ новыми горизонтальными заземлителями, чем обеспечены дополнительные пути растекания тока КЗ. Произведен монтаж сетчатых заземлителей (площадок) на всех рабочих местах.
4	Воздействие токов и напряжений промышленной частоты на контрольные кабели и вторичное оборудование при замыкании на землю	При КЗ на шинах ОРУ-220 кВ токи в экранах контрольных кабелей превышают допустимое значение.	Смонтированы новые горизонтальные заземлители, обеспечивающие характер растекания тока КЗ, исключающий недопустимые воздействия на кабели.
5	Импульсные помехи, вызванные повышением потенциала заземлителя при протекании ВЧ составляющей тока КЗ на ОРУ-220 кВ	Значения импульсных помех при КЗ на ОРУ-220 кВ превышают допустимые значения для цепей напряжения, цепей тока, цепей сигнализации..	Смонтированы новые горизонтальные заземлители, обеспечивающие характер растекания тока КЗ, исключающий недопустимые воздействия на вторичные цепи.

### 1.11 Проходной изолятор

Целью работы – изучение влияния тонких проводников на выравнивание напряженности электростатического поля на примере проходного изолятора.

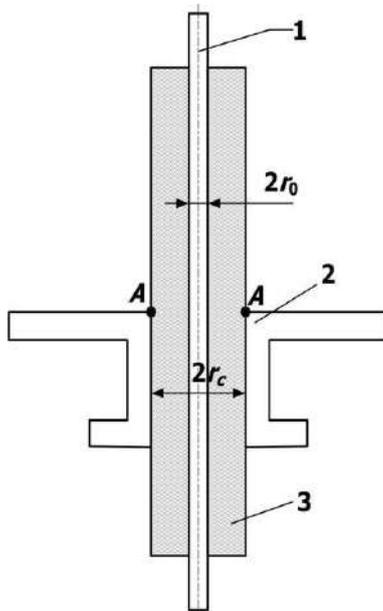
Работа выполняется в студенческой версии системы ELCUT.

Для ввода высокого напряжения внутрь металлических баков высоковольтных трансформаторов, масляных выключателей, силовых конденсаторов и других видов оборудования высокого напряжения используются проходные изоляторы. Конструкцию проходных изоляторов (рисунок 1.72) отличает весьма неблагоприятное расположение электродов, приводящее к крайне неравномерному распределению напряженности электростатического поля (как радиальной, так и аксиальной компоненты). В первом приближении можно считать, что заземленный фланец и токоведущий стержень образуют цилиндрический конденсатор, для которого свойственна неравномерность распределения напряженности поля по радиусу. В соответствии с этим радиальная напряженность поля вблизи стержня значительно превышает напряженность поля вблизи фланца. Если не учитывать влияние краев, то радиальную компоненту напряженности можно определить по формуле

$$E_r = \frac{U}{r \ln \frac{r_0}{r_c}}$$

Кроме того, к неравномерности поля (аксиальной компоненты напряженности, направленной вдоль поверхности изоляции) приводит отличие продольных размеров обкладок конденсатора. В результате, наибольшая напряженность поля имеет место у края фланца, вблизи точки *A*. Для обеспечения хорошей электрической прочности изоляции необходимо сгладить неравномерность распределения напряженности. Для достижения более равномерного распределения радиальной компоненты напряженности изоляцию делают расслоенной: между слоями диэлектрика равной толщины прокладывают тонкие металлические цилиндры из алюминиевой фольги

толщиной 10–20 мкм. В результате получается несколько вложенных друг в друга цилиндрических конденсаторов. Чтобы получить приблизительно равномерное распределение радиальной компоненты напряженности поля во всех слоях изоляции, размеры цилиндров (радиус и длина) должны обеспечивать равные заряды на каждом конденсаторе.



1 – токоведущий стержень; 2 – заземленный фланец;  
3 – изоляция (бумажно-масляная или бакелитовая)

Рисунок 1.72 – Эскиз проходного изолятора

Элементарный конденсатор, образуемый цилиндрическим слоем длиной  $h$  и радиусами  $r$  и  $r + \Delta r$ , имеет емкость (рисунок 1.73а)

$$C = \frac{2\pi\epsilon r h}{\Delta r}.$$

Заряд такого конденсатора будет

$$q = C\Delta U = \frac{2\pi\epsilon r h}{\Delta r} \Delta U \approx -2\pi\epsilon r h E_r,$$

где

$$E_r \approx -\frac{\Delta U}{\Delta r}.$$

Для выполнения условий  $E_r = const$  и  $q = const$  радиусы и длины конденсаторных обкладок должны подчиняться равенству

$$rh = const. \quad (1.25)$$

Для улучшения распределения напряженности электростатического поля вблизи краев обкладок, например в области *A* (рисунок 1.73*a*) используют дополнительные цилиндрические кольца из фольги, располагаемые у краев основных обкладок (рисунок 1.73*б*). При изготовлении проходных изоляторов обычно используется не более 2–5 манжет с тем, чтобы толщина слоя изоляции между ними была не менее 1 мм.

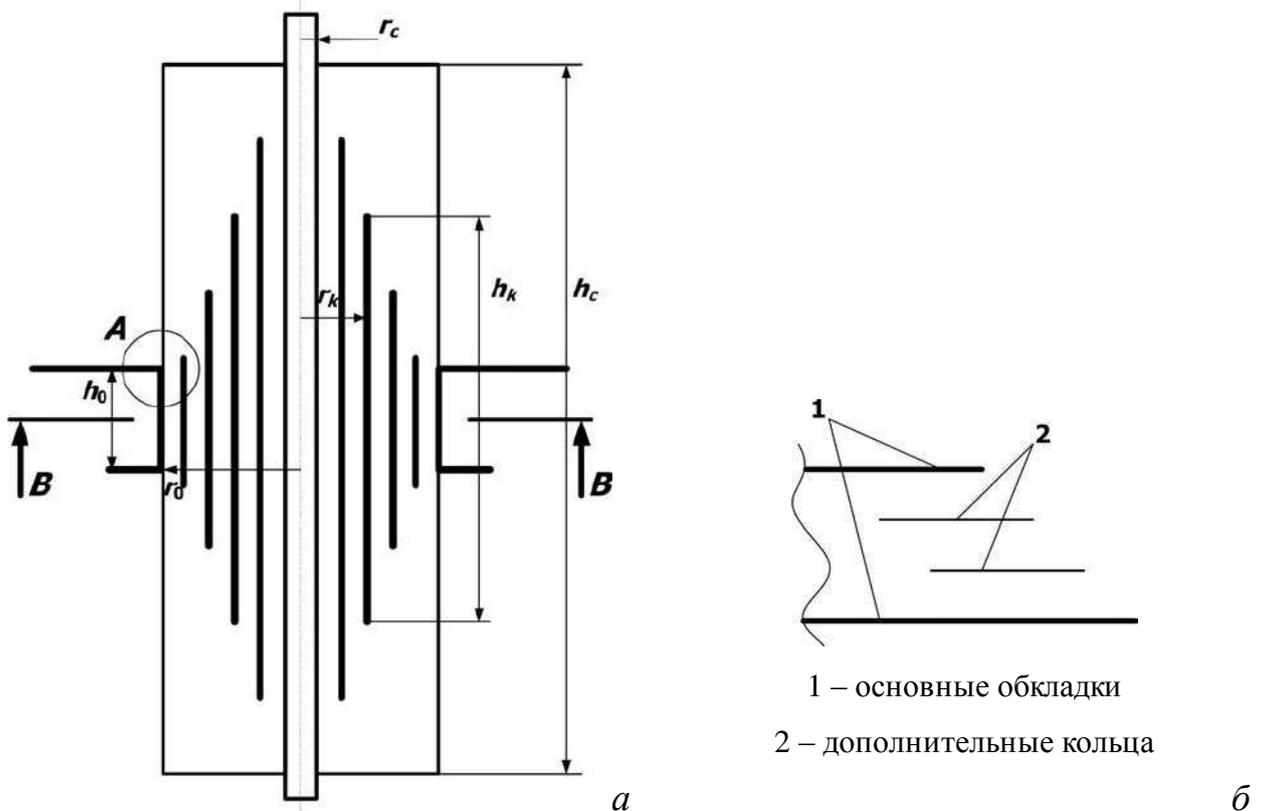


Рисунок 1.73 – Эскиз проходного изолятора конденсаторного типа с проводящими обкладками (*a*) и эскиз расположения дополнительных обкладок (*б*)

### 1.11.1 Задание на работу

1. Получить вариант задания у преподавателя.
2. Для проходного изолятора с заданными размерами стержня и фланца рассчитать электростатическое поле без использования обкладок.
3. Рассмотреть вариант исполнения изолятора с одной основной обкладкой при отсутствии и наличии дополнительных колец.

4. Рассчитать электростатическое поле при использовании такого количества основных обкладок, чтобы толщина слоя изоляции между ними равнялась 1 мм.
5. Сопоставить все рассмотренные варианты и дать рекомендации по конструктивному исполнению изолятора.
6. Сформировать выводы по работе.
7. Оформить отчет.

Варианты заданий приведены в таблице 1.14.

Таблица 1.14 – Варианты заданий

№	$U_0$ , кВ	$\epsilon_r$	$r_c$ , мм	$h_c$ , мм	$r_0$ , мм	$h_0$ , мм
1	3	2.5	2	48	12	8
2	3	4.5	2	56	14	8
3	3	3.5	3	44	13	10
4	6	2.5	3	50	15	10
5	6	4.5	4	35	14	10
6	6	3.5	4	42	14	12
7	10	2.5	4	49	14	14
8	10	4.5	4	40	16	10
9	10	3.5	4	48	16	12

### 1.11.2 Методические указания к работе

При создании расчетной модели проходного изолятора следует учесть наличие осевой симметрии его конструкции и симметрии верхней и нижней частей плоскости сечения **ВВ** (рисунок 1.73а). Условия симметрии в данной задаче означает равенство нулю производной от электростатического потенциала по направлению нормали к поверхности ( $\partial U/\partial n = 0$ ). Модель расположить горизонтально.

Учитывая наличие электростатического поля не только непосредственно внутри проходного изолятора, но и в окружающем его пространстве, внешние границы расчетной модели должны быть расположены таким образом, чтобы имитировать бесконечное удаление (отсутствие изменение поля в нормальном направлении к границе).

Расчетная модель с рекомендуемыми соотношениями размеров изображена на рисунок 1.74. Перед построением модели требуется по формуле (1.25) рассчитать размеры основных обкладок. Приведенная модель содержит

два блока (1-2-12-11-1) и (3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-3) с разными диэлектрическими свойствами.

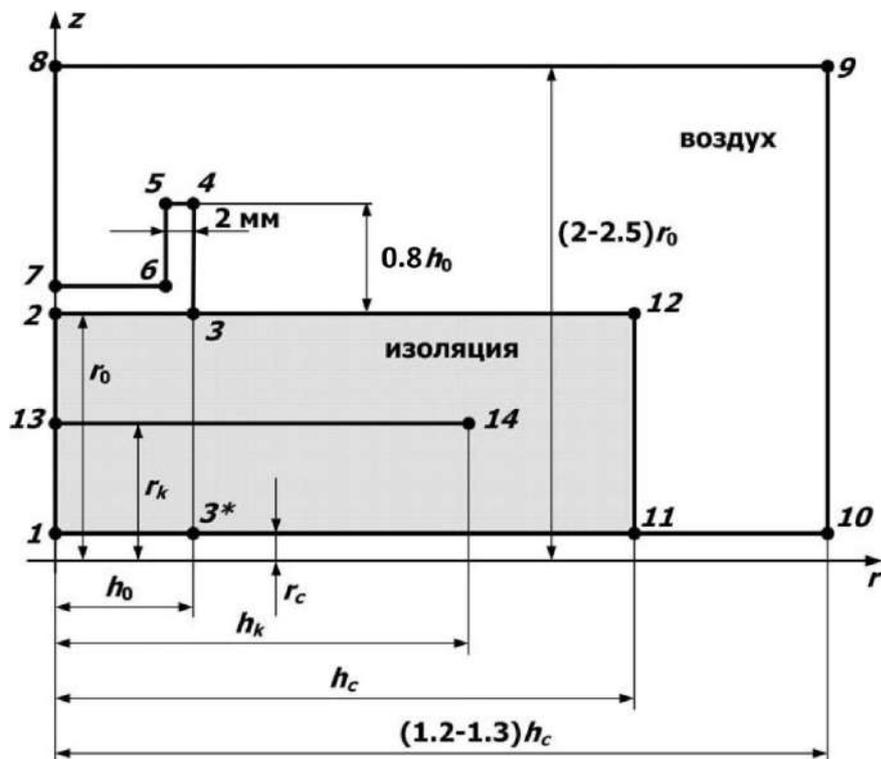


Рисунок 1.74 – Расчетная модель проходного изолятора

Граничные условия:

- 1-10 – заданный потенциал ( $U=U_0$ );
- 2-3-4-5-6-7 – нулевой потенциал ( $U=0$ );
- 7-8-9-10 – условие симметрии ( $\sigma=0$ );
- 13-14 – изолированный проводник (задается на основных обкладках и дополнительных кольцах).

Далее приведен пример расчета размеров и построения модели с двумя тонкими металлическими цилиндрами для варианта №5. Поскольку  $h_c \cdot r_c = 35 \cdot 4 = 140$  мм и  $h_k \cdot r_k = 20 \cdot 7 = 140$  мм, то и  $h_0 \cdot r_0$  должно быть равно 140 мм. Так же при построении модели необходимо соблюдать пропорции. Поэтому в данном случае подходящим будет взять значение  $h_0 \cdot r_0 = 10 \cdot 14 = 140$  мм.

При добавлении второго цилиндра на расстоянии 3 мм по оси  $y$  от первого  $h_k \cdot r_k = (20-3) \cdot (7+3) = 140$  мм. Т.е. длина этого цилиндра будет равна 17 мм. Аналогичные действия необходимо произвести при добавлении большего

количества цилиндров. Построенная модель приведена на рисунке 1.75.

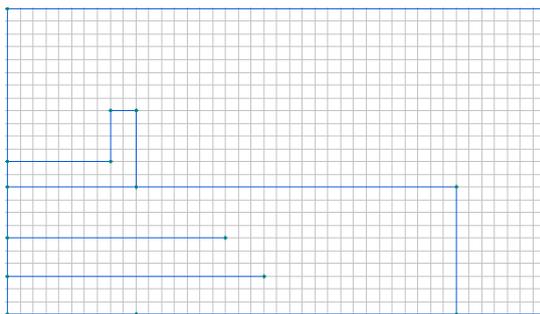


Рисунок 1.75 – Модель проходного изолятора для варианта №5

Инструкция к выполнению работы:

При создании новой задачи ELCUT выбрать следующие настройки: тип задачи – электростатика; класс модели – осесимметричная; единицы длины – миллиметры; система координат – декартова.

При решении данной задачи предпочтительнее использовать неравномерную сетку. Вблизи узлов 8, 9 и 10 сетка может быть крупнее. В областях сильного поля сетку следует измельчить. При использовании студенческой версии существует ограничение на количество узлов. В данном случае рекомендуется в области сильного поля задать шаг дискретизации 1 мм, остальных областях – до нескольких мм.

Напряженность поля рассматривать вдоль контуров 1–2, 3\*–3. Полученные зависимости включить в отчет.

### 1.11.3 Содержание и требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать титульный лист, название работы и цель работы, исходные данные, результаты расчетов, таблицы и графики, анализ результатов и выводы по работе.

Оформление должно соответствовать ОС ТУСУР 01-2013 "работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления".

### 1.12 Ограничитель перенапряжений

Цель работы – моделирование работы ограничителя перенапряжений

нелинейного.

Работа выполняется в студенческой версии системы ELCUT.

Ограничители перенапряжений нелинейные – электрические аппараты, предназначенные для защиты оборудования систем электроснабжения от коммутационных и грозовых перенапряжений (рисунок 1.76). Основным элементом ОПН является нелинейный резистор – варистор, переменное, изменяющееся сопротивление). Основное отличие материала нелинейных резисторов ограничителей состоит в резко нелинейной вольт-амперной (ВАХ) характеристики и повышенной пропускной способности.



Рисунок 1.76 – Общий вид ограничителей перенапряжений нелинейных

Основной компонент материала резисторов ОПН – оксид (окись) цинка  $ZnO$ . Его смешивают с оксидами других металлов – закисью и окисью кобальта, окисью висмута и др. Технология изготовления оксидно-цинковых резисторов весьма сложна и трудоёмка и близка к требованиям при производстве полупроводников – применение химически чистого исходного материала, выполнение требований по чистоте и т.д. Основные операции при изготовлении – перемешивание и измельчение компонентов, формовка (прессование) и обжиг. Микроструктура варисторов включает в себя кристаллы оксида цинка (полупроводник  $n$ -типа) и междукристаллической прослойки (полупроводник  $p$ -типа). Таким образом, варисторы на основе оксида цинка  $ZnO$  являются системой последовательно-параллельно включённых  $p$ - $n$  переходов. Эти переходы и определяют нелинейные свойства варисторов, то есть нелинейную зависимость величины тока, протекающего через варистор, от приложенного к нему напряжения.

В настоящее время варисторы для ограничителей изготавливаются как цилиндрические диски диаметром 28–150 мм, высотой 5–60 мм. На торцевой части дисков методом металлизации наносятся алюминиевые электроды. Боковые поверхности диска покрывают глифталевой эмалью, что повышает пропускную способность при импульсах тока с крутым фронтом. Площадь поперечного сечения варистора определяет пропускную способность варистора по току, а его высота – параметры по напряжению.

При изготовлении ОПН то или иное количество варисторов соединяют последовательно в, так называемую, колонку. В зависимости от требуемых характеристик ОПН и его конструкции, а также имеющихся на предприятии варисторов ограничитель может состоять из одной колонки (состоящей даже из одного варистора) или из ряда колонок, соединённых между собой последовательно/параллельно.

Для защиты электрооборудования от грозовых или коммутационных перенапряжений ОПН включается параллельно оборудованию. Защитные свойства ОПН объясняются ВАХ характеристикой варистора. ВАХ конкретного варистора зависит от многих факторов, в том числе от технологии изготовления, рода напряжения – постоянного или переменного, частоты переменного напряжения, параметров импульсов тока, температуры и др. Типовая ВАХ варистора с наибольшим длительно допустимым напряжением 0,4 кВ в линейном масштабе приведена на рисунке 1.77.

На ВАХ можно выделить три характерных участка: область малых токов; средних токов и больших токов. Область малых токов – это работа варистора под рабочим напряжением, не превышающим наибольшее допустимое рабочее напряжение. В данной области сопротивление варистора весьма значительно. В силу неидеальности варистора сопротивление хотя и велико, но не бесконечно, поэтому через варистор протекает ток, называемый током проводимости. Этот ток мал – десятые доли миллиамперметра.

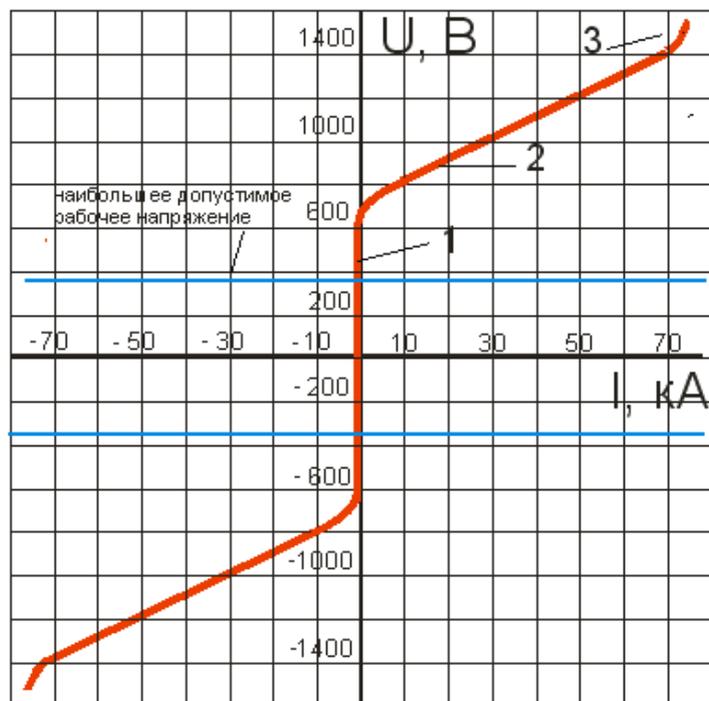


Рисунок 1.77 – Типовая ВАХ варистора

При возникновении грозовых или коммутационных импульсов перенапряжений в сети варистор переходит в режим средних токов. На границе первой и второй областей происходит перегиб ВАХ, при этом сопротивление варистора резко уменьшается (доли Ом). Через варистор кратковременно протекает импульс тока, который может достигать десятков тысяч ампер. Варистор поглощает энергию импульса перенапряжения, выделяя затем её в виде тепла, рассеивая в окружающее пространство. Импульс перенапряжения сети «срезается» (рисунок 1.78).

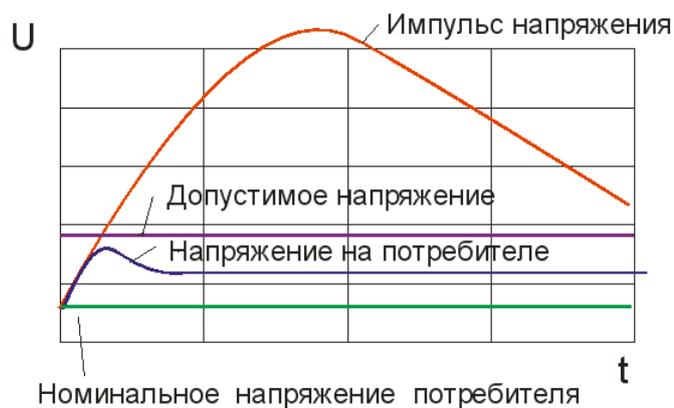


Рисунок 1.78 – Результат работы варистора

В третьей области (больших токов) сопротивление варистора снова резко

увеличивается. Эта область для варистора является аварийной.

### 1.12.1 Задание на работу

Требуется рассчитать ток через ОПН, состоящий из цилиндрических таблеток оксида цинка ZnO, помещенных внутрь керамической трубки. К торцам крайних таблеток присоединены выводные электроды. Форма напряжения, приложенного к ограничителю приведена на рисунке 1.79.

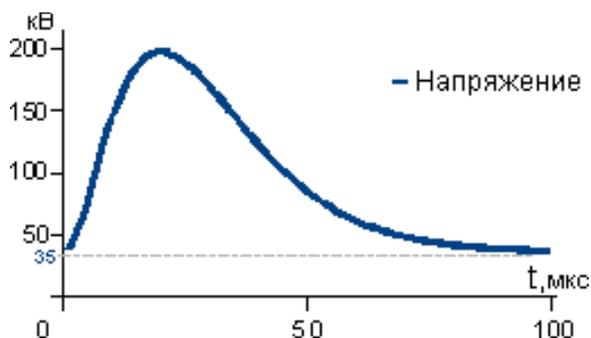


Рисунок 1.79 – Форма приложенного напряжения

### 1.12.2 Методические указания к работе

Тип задачи: осесимметричная задача расчета нестационарного электрического поля (интегрирование по времени - 100мкс, шаг интегрирования – 2мкс, время сохранения данных – 2мкс). Геометрия задачи, а также другие параметры моделирования, а также рекомендуемые размеры расчетной области приведены на рисунке 1.80.

### 1.12.3 Содержание и требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать титульный лист, название работы и цель работы, исходные данные, результаты расчетов, таблицы и графики, анализ результатов и выводы по работе.

Оформление должно соответствовать ОС ТУСУР 01-2013 "работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления".

**Общие**

Тип задачи: нестационарное электрическое поле

Класс модели: осесимметричная

Единицы длины: миллиметры

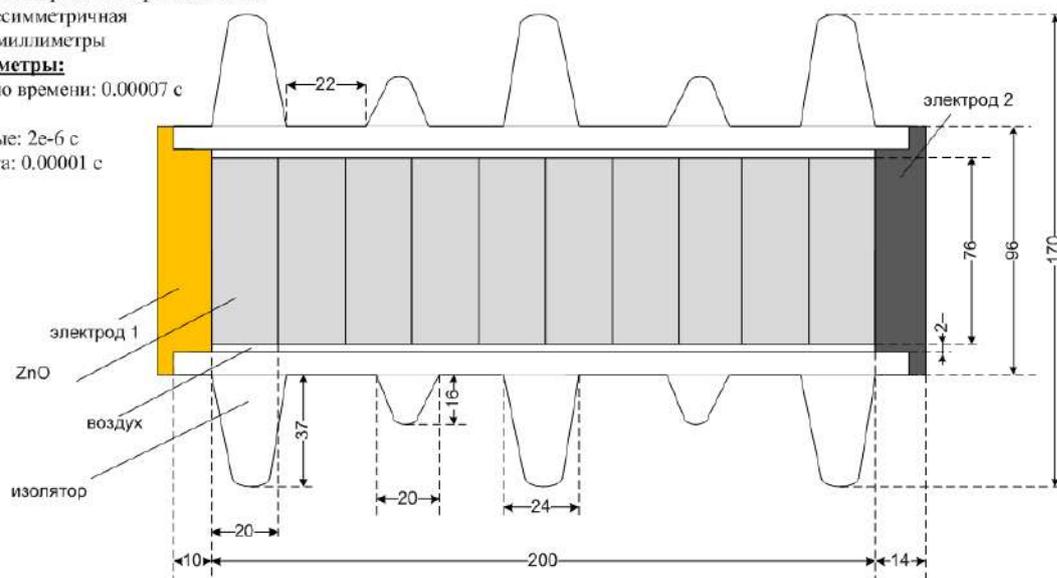
**Временные параметры:**

Интегрирование по времени: 0.00007 с

шаг: 2e-6 с

Запоминать каждые: 2e-6 с

Начиная с момента: 0.00001 с



Относительная диэлектрическая проницаемость ZnO: 60

Электропроводность ZnO: нелинейная

напряженность (В/м) электропроводность (См/м)

0 2e-7

190e3 1e-6

250e3 38e-6

430e3 1.4e-3

1000e3 0.1

Относительная диэлектрическая проницаемость изолятора: 3

Электропроводность изолятора: 1e-12 (См/м)

Напряжение на электроде 1:  $35000 + 3e15*(t-10e-6)^2 * \exp(-1e5*(t-10e-6))$  (В)

Напряжение на электроде 2: 0 (В)

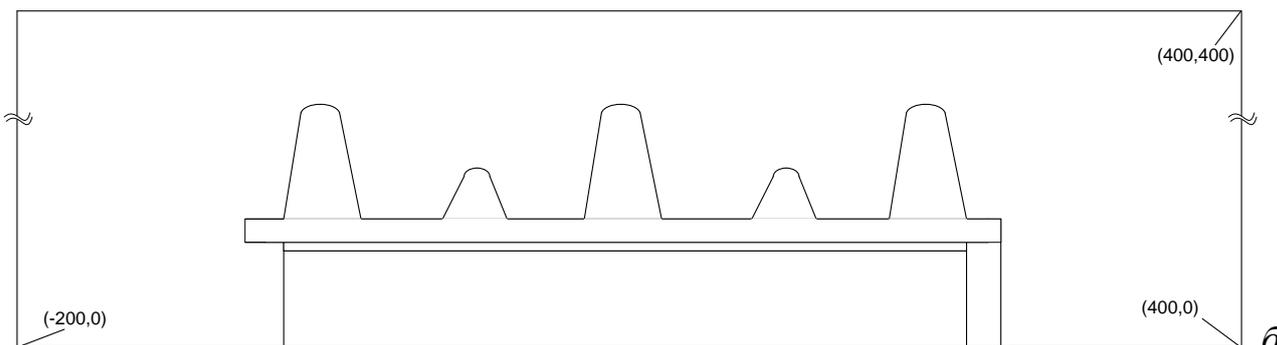


Рисунок 1.80 – ОПН: параметры задачи (а) и размеры расчетной области (б)

**1.13 Поверхностный эффект и эффект близости**

Цель работы – исследование переменного электромагнитного поля в проводящей среде.

Работа выполняется в студенческой версии системы ELCUT.

Переменное электромагнитное поле по мере проникновения в толщу проводящей среды быстро затухает. Это приводит к неравномерному распределению тока и магнитного потока. В установившемся режиме эти значения имеют максимальное значение у поверхности проводника, поэтому

это явление носит название поверхностного эффекта (или скин-эффекта). В большинстве случаев поверхностный эффект является вредным явлением, так как он увеличивает электрическое сопротивление проводника переменному току и магнитное сопротивление переменному магнитному потоку (соответственно приводит к уменьшению индуктивности конструкции). Для инженерных расчетов скин-эффект можно считать резко выраженным, если минимальный характерный размер проводника (или системы проводников)  $R_{\min}$  значительно превышает глубину проникновения электромагнитного поля  $\Delta$ . Для гармонических полей с круговой частотой  $\omega$ :

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}}, \quad (1.26)$$

где  $\mu$  и  $\gamma$  – удельная проводимость и абсолютная магнитная проницаемость проводящей среды соответственно.

На практике в качестве соединительных элементов или отдельных конструкций часто используются плоские шины (рисунок 1.81) – две близко расположенные параллельные пластины, по которым в противоположных направлениях протекает ток. При таком расположении поле одной шины влияет на распределение поля в другой шине. Это явление называют эффектом близости. В результате комплексное сопротивление единицы длины двух плоских шин, расположенных в воздухе, равно комплексным сопротивлениям шин плюс индуктивное сопротивление, обусловленное магнитным потоком, проходящим в пространстве между шинами.

В случае тонких близко расположенных шин ( $a \ll b$  и  $h \ll b$ ) или, соответственно, при резко выраженном скин-эффекте индуктивность пары шин с противоположным направлением тока будет минимальной. При известной длине шин  $l$  для ее расчета можно воспользоваться простой приближенной формулой:

$$L = \mu_0 \frac{hl}{b}, \quad (1.27)$$

дающей удовлетворительный результат при  $(a + h)/b \leq 0,1$ .

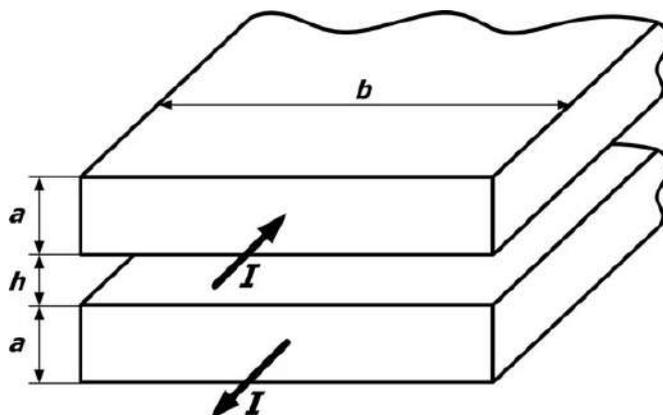


Рисунок 1.81 – Плоские шины

### 1.13.1 Задание на работу

1. Получить вариант задания у преподавателя.
2. Исследовать поверхностный эффект в плоской шине – получить распределение плотности тока по средним линиям сечения для заданных частот.
3. Проанализировать взаимное влияние шин (эффект близости) при противоположном и совпадающем направлении тока в шинах для заданных частот (на примере распределения плотности тока в среднем сечении шин).
4. Исследовать влияние частоты электромагнитного поля на индуктивность и активное сопротивление шин при противоположном протекании тока.
5. Оценить, при какой частоте для расчета индуктивности можно воспользоваться формулой (1.27).
6. Сформировать выводы по работе.
7. Оформить отчет.

### 1.13.2 Методические указания к работе

При составлении расчетной модели задачи (рисунок 1.82) не учитывается симметрия проводников относительно средней плоскости сечения. Внешние границы расчетной модели расположены таким образом, чтобы имитировать бесконечное удаление. Условием полного затухания магнитного поля служит

равный нулю векторный магнитный потенциал.

Варианты заданий приведены в таблице 1.15.

Таблица 1.15 – Варианты заданий

№	$a$ , мм	$h$ , мм	$b$ , мм
1	10	6	120
2	6	6	120
3	10	10	120
4	20	8	120
5	20	10	120
6	20	20	120
7	6	4	100
8	10	6	100
9	10	10	100
10	20	20	100

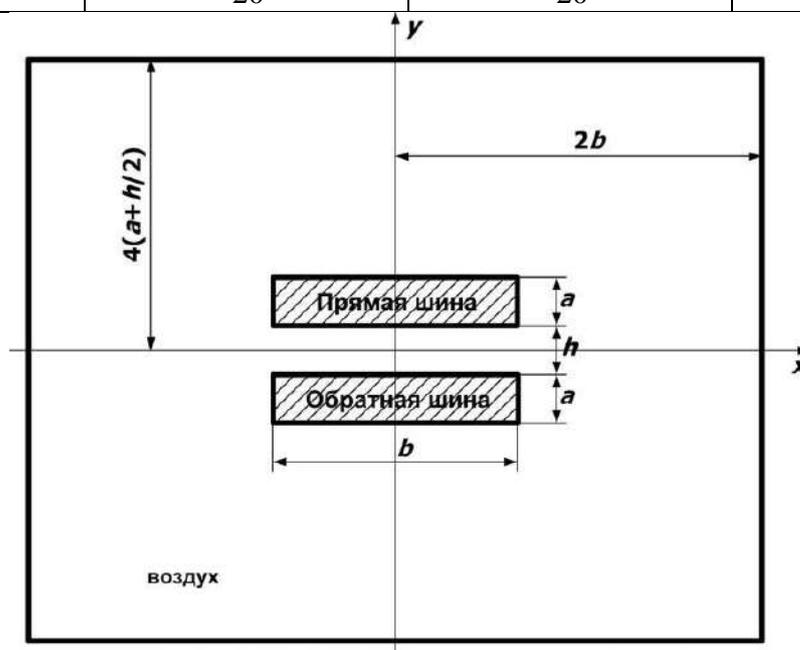


Рисунок 1.82 – Геометрическая модель задачи

Тип задачи – магнитное поле переменных токов (указать требуемое значение частоты); класс модели – плоская; единицы длины – миллиметры; система координат – декартова.

Характеристиками шин (блоков) в данной задаче являются магнитная проницаемость ( $\mu=1$  во всех блоках – материалы немагнитные), электропроводность (в воздухе принять нулевой, а шины считать медными с проводимостью  $g=5,8 \cdot 10^7$  См/м) и полный ток в шинах. В прямой шине амплитуду принять  $I_0=10$  А, фазу  $\varphi=0^\circ$ . При исследовании поверхностного эффекта в прямой шине обратную шину описать как воздух. При исследовании

эффекта близости при совпадении направлении токов в шинах в обратной шине задать  $I_0=10$  А,  $\varphi=0$ , при противоположных направлениях:  $I_0=10$  А,  $\varphi=180^\circ$ .

При решении данной задачи предпочтительнее использовать неравномерную сетку. Вблизи удаленных границ размер элементов сетки может быть задан 5-6 мм. В областях сильного поля, т.е. вблизи поверхности шин шаг дискретизации следует определить 0,5 мм. Чтобы задать значение шага дискретизации следует:

При построении зависимости плотности тока в среднем сечении прямой шины по оси  $Oy$ : «Контур» – «Ввод линии» и указать координаты начальной точки  $x=0$ ,  $y=h/2$  и конечной точки  $x=0$ ,  $y=a+h/2$ . Далее выбрать «Вид»– «График» и из предложенного набора величин выбрать «Плотность тока». Полученную зависимость вставить в отчет. Аналогично получают зависимости плотности тока в среднем сечении прямой шины по оси  $Ox$ .

Для вычисления индуктивности и активного сопротивления шин выбрать «Вид»–«Мастер импеданса», и далее в предложенном списке выделить оба проводника.

Диапазон частот для анализа индуктивности и активного сопротивления шин: 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000 Гц. Для построения графиков рекомендуемая частота 500 Гц.

### **1.13.3 Содержание и требования к оформлению отчета**

Отчет должен содержать титульный лист, название работы и цель работы, исходные данные, результаты расчетов, таблицы и графики, анализ результатов и выводы по работе.

Оформление должно соответствовать ОС ТУСУР 01-2013 "работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления".

### **1.14 Защита объектов электроэнергетики от прямых ударов молнии**

Цель работы – изучение комплекса мероприятий для защиты зданий и

сооружений объектов электроэнергетики от взрывов, пожаров, разрушений и электромагнитных воздействий, вызванных прямыми ударами молнии.

Молния представляет собой электрический разряд длиной несколько километров, развивающийся между грозовым облаком и землей или каким-либо наземным сооружением. Разряд молнии начинается с развития лидера – слабосветящегося канала с током в несколько сотен ампер. По направлению движения лидера от облака вниз или от наземного сооружения вверх молнии подразделяются на нисходящие и восходящие. Лидер нисходящей молнии возникает под действием процессов между облаками, и его появление не зависит от наличия на поверхности земли каких-либо сооружений. По мере продвижения лидера к земле с наземных объектов могут возбуждаться направленные к облаку встречные лидеры. Соприкосновение одного из них с нисходящим лидером (или касание последним поверхности земли) определяет место удара молнии в землю или какой-либо объект.

Воздействия молнии принято подразделять на две основные группы:

- первичные, вызванные прямым ударом молнии;
- вторичные, индуцированные её разрядами или занесённые в объект протяжёнными металлическими коммуникациями.

Прямой удар молнии вызывает следующее воздействие на объект:

- электрические, связанные с поражением людей или животных электрическим током и появлением перенапряжения в несколько мегавольт на пораженных элементах, в том числе опасные напряжения шага и прикосновения, «перекрытия» на другие объекты;
- термические, связанные с резким выделением теплоты при прямом контакте канала молнии с содержимым объекта и при протекании через объект молнии. В 95 % случаев разрядов молнии эта энергия на два-три порядка превышает энергию воспламенения большинства газо-, паро- и пылевоздушных смесей, используемых в промышленности. Прямой контакт с каналом молнии может привести

проплавлению корпусов взрывоопасных установок и вызвать пожары и взрывы;

- механические, обусловленные мощной ударной волной, распространяющейся от канала молнии, и электродинамическими силами, действующими на проводники с токами молнии. Это воздействие может быть причиной, например, сплющивания тонких металлических трубок и даже механических разрушений объектов. Вторичные проявления молнии связаны с действием на объект электромагнитного поля близких разрядов. Обычно это поле рассматривают в виде двух составляющих: первая обусловлена перемещением зарядов в лидере и канале молнии (электростатическая индукция), вторая – изменением тока молнии во времени (электромагнитная индукция).

Электростатическая индукция проявляется в виде перенапряжения (до сотен киловольт), возникающего на металлических конструкциях объекта и зависящего от тока молнии, расстояния до места удара и сопротивления заземлителя. Она связана с наведением в металлических контурах ЭДС величиной в несколько десятков киловольт. В местах сближения протяженных металлических конструкций, в разрывах незамкнутых контуров создается опасность перекрытий и искрений.

Еще одним видом опасного воздействия молнии является занос потенциала по вводимым в объект коммуникациям (кабелям, наземным и подземным конструкциям, трубопроводам, проводам воздушных линий электропередачи).

#### **1.14.1 Основные характеристик разряда молнии**

Об интенсивности грозовой деятельности в различных районах Земли судят по повторяемости и продолжительности гроз, регистрируемых в днях или часах за год по слышимому грому в начале и конце грозы. Однако более важной характеристикой для оценки возможного числа поражений объектов молнией является плотность ударов молнии в землю.

Интенсивность грозовой деятельности характеризуется числом грозовых часов  $n$  или грозовых дней  $n'$  в году ( $n \approx 1,5n'$ ). Число ударов молнии в  $1 \text{ км}^2$  поверхности земли составляет в среднем 0,067 за один грозовой час. Число ударов молнии в отдельно стоящий молниеотвод высотой  $h$ , м, равно:

$$N = 1,5\pi n h^2 \cdot 10^{-6}. \quad (1.28)$$

Число ударов молнии в год в линию электропередачи длиной  $l$ , км, со средней высотой подвеса верхнего провода или троса  $h_{\text{cp}}$ , м:

$$N = 4nh_{\text{cp}}l \cdot 10^{-4}. \quad (1.29)$$

В таблице 1.16 приведены некоторые параметры разрядов молнии для равнинной местности.

Таблица 1.16 – Параметры разрядов молнии

Параметры	Наиболее часто встречающиеся значения	Зарегистрированное значение	
		наибольшее	наименьшее
Полярность	до 80% отрицательная	–	–
Токи молнии (амплитудные значения), зарегистрированные в опорах, кА	до 20	200–300	0,5
Заряд, переносимый молнией, Кл	до 20	100	0,5
Длительность импульса тока молнии, мкс	10–30	100	менее 10
Длительность фронта импульса тока молнии, мкс	1,5–10	80–90	менее 1
Крутизна фронта импульса тока молнии, А/мкс	5000	50 000	–
Количество импульсов в разряде	2-3	20	1
Продолжительность разряда молнии, с	0,2-0,6	1,33	–

В горной местности из-за сокращения расстояния от земли до облаков амплитудные значения токов молнии уменьшаются примерно в два раза. Молнии возникают при меньших скоплениях зарядов в облаках. Длительность тока молнии в большинстве разрядов 20–100 мкс, средняя длительность близка к 50 мкс. Около 80% разрядов молнии имеет отрицательную полярность. Заряд, переносимый молнией, составляет до 100 Кл, в среднем – 20 Кл.

Вероятностное распределение амплитудных значений токов молнии

приведено на рисунке 1.83а. До 40% всех разрядов имеют токи с амплитудными значениями меньше 20 кА. Вероятность того, что амплитуда тока молнии равна или больше  $I_m$  для местностей до 500 м над уровнем моря, оценивается по формуле:

$$\lg P_I = -\frac{I_m}{60}. \quad (1.30)$$

Крутизна фронта импульса тока молнии влияет на перенапряжения, возникающие в электроустановках. Она изменяется в широких пределах. Имеет слабую тенденцию возрастать при увеличении амплитудного значения тока молнии. На рисунке 1.83б показано вероятностное распределение крутизны фронта импульса тока молнии. Вероятность тока молнии с крутизной фронта, превышающей  $I'_m$ , кА/мкс, оценивается по формуле:

$$\lg P_{I'} = -\frac{I'_m}{36}. \quad (1.31)$$

Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту определяется формулой:

$$\lg P_\alpha = \alpha \frac{\sqrt{h_{on}}}{90} - 4, \quad (1.32)$$

где  $h_{on}$  – полная высота опоры, м;  $\alpha$  – угол защиты крайнего провода, град. Вероятность перехода импульсного перенапряжения в силовую дугу  $\eta$  зависит от среднего градиента рабочего напряжения вдоль пути перекрытия  $E_{cp} = U_{раб}/l$  и определяется формулой:

$$\Psi_g = (1,6E_{cp} - 6) \cdot 10^{-2}. \quad (1.33)$$

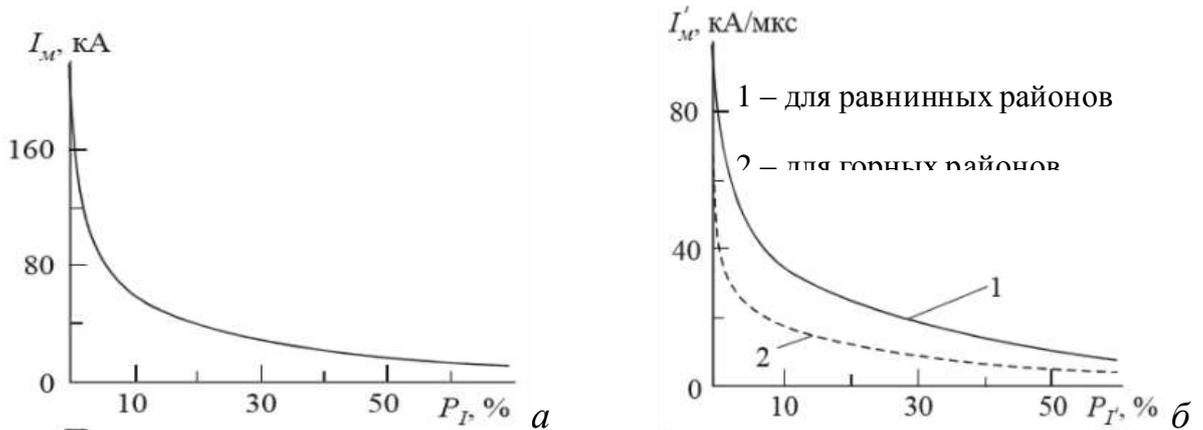
Для ВЛ с заземленной точкой подвеса гирлянды можно принять  $\Psi_g = 0,7$  для ВЛ до 220 кВ включительно и  $\Psi_g = 1$  для ВЛ 330 кВ и выше.

### 1.14.2 Мероприятия по грозозащите воздушных линий электропередачи

Надежность грозозащиты ВЛ обеспечивается:

- подвеской грозозащитных тросов с углами защиты 20–30°;
- снижением импульсного сопротивления заземления опор;

- повышением импульсной прочности изоляции линий и снижением вероятности установления силовой дуги (в частности, использованием деревянных траверс и опор);
- применением изолированной нейтрали или дугогасящей катушки;
- использованием АПВ линий.



Процент токов молнии, превышающих значение, указанное ординатой

Процент крутизны фронта импульса тока молнии, превышающих значение, указанное ординатой

Рисунок 1.83 – Вероятностное распределение токов молнии (а) и вероятностное распределение крутизны фронта импульса тока молнии (б)

Применение грозозащитных тросов на линиях 6–500 кВ не требуется:

- для всех ВЛ напряжением до 35 кВ;
- для линий 110 кВ на деревянных опорах;
- в районах с числом грозových часов в году менее 20;
- на отдельных участках ВЛ с удельным сопротивлением грунтов более  $10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
- на участках трассы с расчетной толщиной стенки гололеда более 20 мм.

Дополнительных мер защиты на воздушных линиях электропередачи требуют:

- пересечения ВЛ между собой;
- пересечения ВЛ с линиями связи, трамвайными линиями и линиями электрофицированных железных дорог;
- опоры ВЛ со сниженной электрической прочностью;

- высокие опоры переходных пролетов;
- ответвления к подстанциям на отпайках и секционирующие разъединители на линиях;
- кабельные вставки на воздушных линиях.

### **1.14.3 Защита подстанций от прямых ударов молнии**

#### **1.14.3.1 Общие положения**

Открытые распределительные устройства и открытые подстанции 20–500 кВ должны быть защищены от прямых ударов молнии (ПУМ). Допускается не защищать:

- подстанции 20 и 35 кВ с трансформаторами единичной мощностью 1,6 МВА и менее независимо от числа грозových часов в году;
- ОРУ и подстанции 20 и 35 кВ в районах с числом грозových часов в году не более 20;
- ОРУ и подстанции 220 кВ и ниже на площадках с эквивалентным удельным сопротивлением земли  $\rho$  в грозовой сезон более  $2 \cdot 10^3$  Ом·м при числе грозových часов в году не более 20.

Здания ЗРУ и закрытых подстанций следует защищать от прямых ударов молнии в районах с числом грозových часов более 20. Защиту зданий ЗРУ и закрытых подстанций, имеющих металлические покрытия кровли или железобетонные несущие конструкции кровли, следует выполнять заземлением этих покрытий (конструкций). Для защиты зданий ЗРУ и закрытых подстанций, крыша которых не имеет металлических или железобетонных покрытий либо несущих конструкций или не может быть заземлена, следует устанавливать стержневые молниеотводы или молниеприемные сетки непосредственно на крыше зданий.

Мероприятия по защите объектов подстанций от ПУМ приведены в таблице 1.17, а место и условия установки стержневых молниеотводов – в таблице 1.18.

Таблица 1.17 – Защита подстанций от прямых ударов молнии

Защищаемые объекты	Защитные мероприятия
Открытые распределительные устройства, в том числе гибкие мосты и шинные связи	Стержневые молниеотводы
Здания машинного зала при числе грозových часов в году более 20	1. Заземление металлических или железобетонных конструкций кровли или металлической кровли. 2. Стержневые молниеотводы или молниеприемные сетки на крыше зданий при невозможности выполнения п. 1
Дымовые трубы: металлические кирпичные, бетонные и железобетонные	Заземление Стальной молниеотвод и заземляющий спуск, присоединенный к заземлителю
Здания трансформаторной башни, маслохозяйства, нефтехозяйства, электролизной и ацетиленогенераторной станции	1. Отдельно стоящий стержневой или тросовый молниеотвод 2. Импульсное сопротивление каждого заземлителя не более 10 Ом при $\rho < 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и не более 40 Ом при $\rho \geq 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Заземление металлических корпусов
Угледробилки, вагоноопрокидыватели, резервуары с горючими жидкостями или газами, места хранения баллонов с водородом	1. Молниеотвод, установленный отдельно или на самом сооружении при толщине крыши менее 4 мм. 2. Заземление корпуса установки при: а) толщине металла крыши 4 мм и более; б) объеме емкости менее $200 \text{ м}^3$ независимо от толщины металла крыши

Таблица 1.18 – Место и условия установки стержневых молниеотводов

Место установки молниеотвода	Условия установки молниеотвода
Конструкции ОРУ	1. В ОРУ 35–150 кВ при условии выполнения мероприятий, приведенных в таблице 1.19. В ОРУ 220 кВ и выше
Трансформаторные порталы, порталы шунтирующих реакторов и конструкции ОРУ, удаленные от трансформаторов или реакторов по магистралям заземления менее 15 м	1. Удельное сопротивление грунта в пределах контура заземления подстанции в грозовой сезон не более 350 Ом·м 2. Непосредственно на выводах обмоток 3–35 кВ трансформаторов или на расстоянии не более 5 м от них по ошиновке, включая ответвления к разрядникам, должны быть, установлены вентильные разрядники. 3. От портала с молниеотводом должно обеспечиваться растекание тока молнии по магистралям заземления в трех-четырёх направлениях 4. На расстоянии 3–5 м от портала с молниеотводом на каждой магистрали заземления должно устанавливаться по 2–3 вертикальных электрода длиной 3–5 м 5. На подстанциях с высшими напряжениями 20 и 35 кВ при установке молниеотвода на трансформаторном портале сопротивление заземляющего контура ОРУ не должно превышать 4 Ом (без учета выносного заземления) 6. Заземляющие проводники вентильных разрядников и трансформаторов рекомендуется присоединять к заземляющему устройству подстанции поблизости один от другого или выполнять так, чтобы место присоединения вентильного разрядника к заземляющему устройству находилось между точками присоединения заземляющих проводников портала с молниеотводом и трансформатора

Отдельно стоящие молниеотводы с обособленными заземлителями	<p>1. Если не могут быть выполнены условия установки молниеотвода на конструкциях ОРУ.</p> <p>2. Расстояние <math>S_3</math>, м, между обособленным заземлителем молниеотвода и контуром ОРУ должно быть равным <math>S_3 \geq 0,2R_{imp}</math>, но не менее 3 м, где <math>R_{imp}</math> – импульсное сопротивление заземления, Ом, отдельно стоящего молниеотвода при импульсном токе 60 кА.</p> <p>3. Расстояние по воздуху <math>S_6</math>, м, от отдельно стоящего молниеотвода с обособленным заземлителем до токоведущих частей, заземленных конструкций и оборудования ОРУ должно быть равным <math>S_6 \geq 0,12R_{imp} + 0,1H</math>, но не менее 5 м, где <math>H</math> – высота рассматриваемой точки молниеотвода над уровнем земли, м.</p> <p>4. Сопротивление заземлителя не более 80 Ом</p>
---	---

Примечания.

1. Не допускается установка молниеотводов на конструкциях ОРУ, находящихся на расстоянии менее 15 м от следующих объектов: трансформаторов, к которым гибкими связями или открытыми шинпроводами присоединены вращающиеся машины; открытых токопроводов и опор гибких связей, если к ним присоединены вращающиеся машины.

2. Порталы трансформаторов, связанных с вращающимися машинами открытыми токопроводами или гибкими связями, а также трансформаторные порталы подстанций, удельное сопротивление грунта на площадках которых превышает 350 Ом·м, должны входить в зону защиты отдельно стоящих или установленных на других порталах молниеотводов.

3. При установке стержневых молниеотводов на конструкциях ОРУ следует использовать также защитное действие высоких объектов: опор воздушных линий электропередачи, прожекторных мачт, радиомачт и т.п.

Таблица 1.19 – Мероприятия по снижению обратных перекрытий ОРУ 35–150 кВ

$U_{ном}$ , кВ	Удельное сопротивление грунта в грозовой сезон, Ом·м	Площадь, занимаемая заземляющим контуром, м <sup>2</sup>	Число направлений растекания тока по магистралям заземления	Вертикальные электроды		
				число	длина	расстояние от стойки с молниеотводами, м
35	Менее 500 500–700	Не нормируется 10000 и более	3–4	2–3	3–5	Не менее длины электрода
110–150	Менее 1000 1000–2000	Не нормируется 1000 и более	2–3	1–2	3–5	

Примечания.

1. Гирлянда изоляторов на порталах 35 кВ с установленными на них молниеотводами должна иметь на два изолятора больше.

2. Расстояния по воздуху между конструкциями ОРУ, на которых установлены молниеотводы, и токоведущими частями должны быть не менее длины гирлянды.

3. Место присоединения стойки конструкции с молниеотводом к заземляющему устройству должно быть удалено по магистралям заземления от места присоединения к нему бака трансформатора на расстояние не менее 15 м. Рекомендуется по возможности присоединять молниеотводы и баки трансформаторов к разным магистралям заземления.

### 1.14.3.2 Конструктивное выполнение молниеотводов

Отдельно стоящие стержневые молниеотводы выполняются

железобетонными и металлическими в виде составных решетчатых конструкций. Рекомендуется молниеотводы выполнять в виде свободностоящих конструкций без растяжек.

Молниеприемники должны выдерживать термические и электрические воздействия тока молнии. Стержневые и однопроволочные тросовые молниеприемники выполняют сечением 50–100 мм<sup>2</sup>. Поперечное сечение стальных многопроволочных тросов должно быть не менее 35 мм<sup>2</sup>. Допустимые минимальные сечения токоотводов указаны в таблице 1.20 с учетом различной степени коррозии внутри и вне сооружения. Молниеприемники и токоотводы предохраняются от коррозии покраской. Многопроволочные стальные тросы оцинковываются. Соединения частей токоотводов между собой, а также с молниеприемниками и заземлителями производятся в основном сваркой.

### 1.14.3.3 Концепции определения защитного действия молниеотводов

Нормы, по которым выполняется проектирование систем молниезащиты, основаны на расчете и выборе зон защиты стержневых или тросовых молниеотводов при заданной надежности защиты объекта. Для расчета зон защиты используются геометрическая, электрогеометрическая и вероятностная методики. При этом надежность защиты определяется категорией объекта и устанавливается в пределах 0,99–0,9999.

Таблица 1.20 – Минимальные сечения токоотводов

Профиль токоотводов	Место расположения токоотвода		
	внутри сооружения	снаружи сооружения	в земле
Круглые и тросы: диаметр, мм	5	6	6
Прямоугольные: сечение, мм <sup>2</sup> толщина, мм	24	48	48
	3	4	4
Угловая сталь: сечение, мм <sup>2</sup> толщина полок, мм	24	48	48
	2	2,5	4
Трубы: толщина стенок, мм	1,5	2,5	3,5

К настоящему времени сложились две концепции расчетного определения защитного действия молниеотводов. Обе концепции исходят из того, что лидер

молнии реагирует на объект, возвышающийся над поверхностью земли, с некоторой высоты  $H_0$ , которая называется высотой ориентировки, или с так называемого расстояния поражения.

**Первая концепция** основана на определении электрической прочности разрядных промежутков, образованных лидером на высоте ориентировки и заземленными объектами на поверхности земли. На её основе разработана электрогеометрическая методика расчета зон защиты объекта. Суть методики заключается в том, что из точки на высоте ориентировки молнии определенным радиусом очерчивается окружность, касающаяся вершины самого высокого объекта (молниеприемника) и земли. Расстояние между точками касания вершины молниеприемника и земли является радиусом зоны защиты  $r_0$  по электрогеометрической методике.

**Вторая концепция** основана на том, что лидер, достигший высоты  $H_0$ , с различной вероятностью может перекрыть любой из промежутков на поверхности земли, в том числе и более длинный. Разработанная на ее основе методика вероятностной оценки надежности систем молниезащиты включает ряд допущений, основанных на результатах малоубедительных экспериментальных исследований. В результате эта методика завышает или занижает конфигурацию зон защиты. Например, справедливо, что вероятность прорыва молнии во внутреннюю область между несколькими близко расположенными молниеприемниками значительно меньше, чем во внешнюю область, но вывод о том, что зона защиты многократных молниеотводов должна быть больше суммарного объема зон защиты каждого молниеотвода в отдельности, не подтверждается результатами экспериментальных исследований. Расчеты по вероятностной методике дают необоснованно завышенную надежность молниезащиты, что также подтверждается результатами исследований в длинных искровых промежутках.

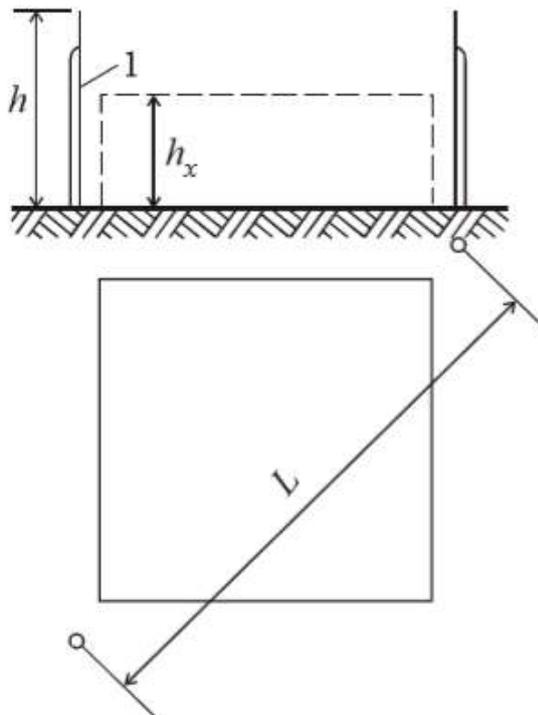
#### **1.14.3.4 Зоны защиты молниеотводов**

На основе лабораторных исследований были определены зоны защиты

молниеотводов высотой  $h \leq 30$  м. В последующем установленные зоны защиты были распространены на молниеотводы высотой до 100 м, при этом была введена поправка, учитывающая снижение эффективности молниеотводов высотой больше 30 м вследствие боковых ударов молнии, поражающих молниеотводы в точках ниже его вершины. В настоящее время нормированы зоны защиты молниеотводов высотой до 150 м. Место и условия установки стержневых молниеотводов для защиты объектов подстанции от ПУМ приведены в таблице 1.18. Высоту отдельно стоящих молниеотводов (рисунок 1.84) выбирают из условия:

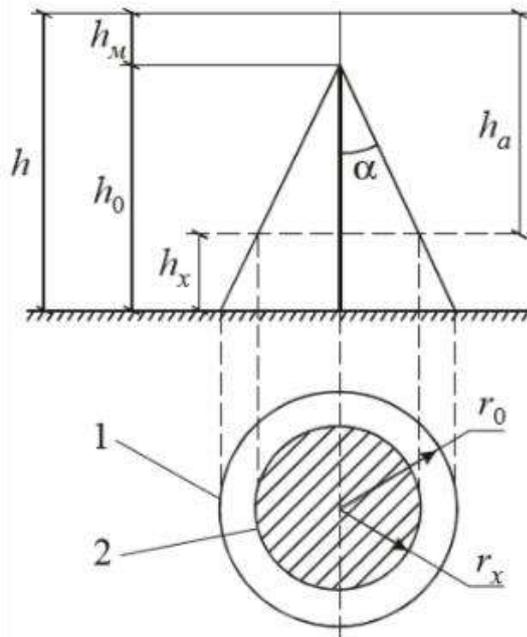
$$L \leq 8(h - h_x), \quad (1.34)$$

где  $h$  – высота молниеотвода,  $h_x$  – габарит подстанции ( $h_x = 7$  м для 35 кВ и  $h_x = 11$  м для 110 кВ). Протяженные объекты защищаются тросовыми молниеотводами. Защитные зоны стержневых и тросовых молниеотводов рассчитываются по формулам таблицы 1.21 и приведены на рисунках 1.85–1.91. Если здание подстанции и ее конструкции накрываются защитной зоной, то дополнительных молниеотводов устанавливать не требуется.



1 – молниеотвод;  $h$  – его высота;  $h_x$  – высота опорных конструкций подстанции;  $L$  – расстояние между молниеотводами

Рисунок 1.84 – Схема расположения отдельно стоящих молниеотводов ОРУ



1 – граница зоны защиты на уровне земли; 2 – то же на уровне  $h_x$

Рисунок 1.85 – Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой до 150 м

Таблица 1.21 – Расчет защитных зон молниеотводов при  $h \leq 150$  м

Зона А: степень надежности защиты $\geq 99,5\%$	Зона Б: степень надежности защиты 95–99,5%
<b>Одиночные стержневые: <math>h = (r_x + 1,63h_x)/1,5</math> (рисунок 1.85)</b>	
$h_0 = 0,85h$ $r_0 = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3}h)h$ $r_x = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3}h)(h - 1,2h_x)$	$h_0 = 0,92h$ $r_0 = 1,5h$ $r_x = 1,5(h - 1,1h_x)$
<b>Двойные стержневые одинаковой высоты: <math>h = (h_c + 0,14L)/1,13</math> (рисунок 1.86)</b>	
<b>При <math>L \leq h</math></b>	
$h_c = h_0$	
$r_{cx} = r_x$	
$r_c = r_0$	
<p style="text-align: center;"><b>При <math>h &lt; L \leq 2h</math></b></p> $h_c = h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4}h)(L - h)$ $r_c = r_0$ $r_{cx} = r_0(h_c - h_x)/h_c$	<p style="text-align: center;"><b>При <math>h &lt; L \leq 6h</math></b></p> $h_c = h_0 - 0,14(L - h)$ $r_c = r_0$ $r_{cx} = r_0(h_c - h_x)/h_c$
<p style="text-align: center;"><b>При <math>2h &lt; L \leq 4h</math></b></p> $h_c = h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4}h)(L - h)$ $r_c = r_0[1 - 0,2(L - 2h)/h]$ $r_{cx} = r_c(h_c - h_x)/h_c$	
<p style="text-align: center;"><b>При <math>L &gt; 4h</math></b></p>	<p style="text-align: center;"><b>При <math>L &gt; 6h</math></b></p>
Молниеотводы рассматривать как одиночные	Молниеотводы рассматривать как одиночные

**Два стержневых разной высоты (рисунок 1.87)**

Габаритные размеры торцевых областей зон защиты  $h_{01}, h_{02}, r_{01}, r_{02}, r_{x1}, r_{x2}$  определяются как для одиночных стержневых молниеотводов.

Габаритные размеры внутренней области зоны защиты определяются по формулам

$$r_c = 0,5(r_{01} + r_{02}); \quad h_c = 0,5(h_{c1} + h_{c2}); \quad r_x = r_c(h_c - h_x)/h_c$$

Значения  $h_{c1}$  и  $h_{c2}$  определяются как для двойных стержневых молниеотводов одинаковой высоты.

**Множественные стержневые (рисунок 1.88)**

Зона защиты строится посредством попарно взятых соседних стержневых молниеотводов.

Основным условием защищенности одного или нескольких объектов высотой  $h_x$  с надежностью зон А и Б является  $r_{cx} > 0$

**Одиночные тросовые:  $h = (r_x + 1,85h_x)/1,7$  (рисунок 1.89)**

$h_0 = 0,85h$ $r_0 = (1,35 - 25 \cdot 10^{-4}h)h$ $r_x = (1,35 - 25 \cdot 10^{-4}h)(h - 1,2h_x)$		$h_0 = 0,92h$ $r_0 = 1,7h$ $r_x = 1,7(h - 1,1h_x)$
--	--	--

**Двойные тросовые одинаковой высоты (рисунок 1.90)**

При  $L \leq h$

$$h_c = h_0$$

$$r_{cx} = r_x$$

$$r_c = r_0$$

При  $h < L \leq 2h$

$$h_c = h_0 - (0,14 + 5 \cdot 10^{-4}h)(L - h)$$

$$r'_x = \frac{L(h_0 - h_x)}{2(h_0 - h_c)}$$

$$r_c = r_0$$

$$r_{cx} = r_0(h_c - h_x)/h_c$$

При  $h < L \leq 6h$

$$h_c = h_0 - 0,12(L - h)$$

$$r'_x = \frac{L(h_0 - h_x)}{2(h_0 - h_c)}$$

$$r_c = r_0$$

$$r_{cx} = r_0(h_c - h_x)/h_c$$

**Двойные тросовые разной высоты (рисунок 1.91)**

Значения  $h_{01}, h_{02}, r_{01}, r_{02}, r_{x1}, r_{x2}$  определяются по формулам одиночных тросовых молниеотводов. Для определения  $r_c$  и  $h_c$  используются формулы

$$r_c = 0,5(r_{01} + r_{02}); \quad h_c = 0,5(h_{c1} + h_{c2}).$$

Значения  $h_{c1}, h_{c2}, r'_{x1}, r'_{x2}, r_{cx}$  вычисляются по формулам двойного тросового молниеотвода

Примечания. 1.

Параметрами молниезащиты являются (все размеры – в метрах):

$h$  – полная высота молниеотвода;

$h_0$  – высота вершины конуса стержневого молниеотвода;

$h_m$  – высота стержневого молниеприемника;

$h_a$  – активная высота молниеотвода;

$h_x$  – высота защищаемого сооружения;

$r_0, r_x$  – радиусы защиты на уровне земли и на высоте защищаемого сооружения;

$h_c$  – высота средней части двойного стержневого молниеотвода;

$2r_c, 2r_x$  – ширина средней части зоны двойного стержневого молниеотвода на уровне земли и на высоте защищаемого объекта;

$\alpha$  – угол защиты (между вертикалью и образующей), град;

$L$  – расстояние между двумя стержневыми молниеотводами;

$a$  – длина пролета между опорами троса;

$h_{оп}$  – высота опоры троса;

$r_x + r'_x$  – ширина зоны тросового молниеотвода на уровне защищаемого сооружения;

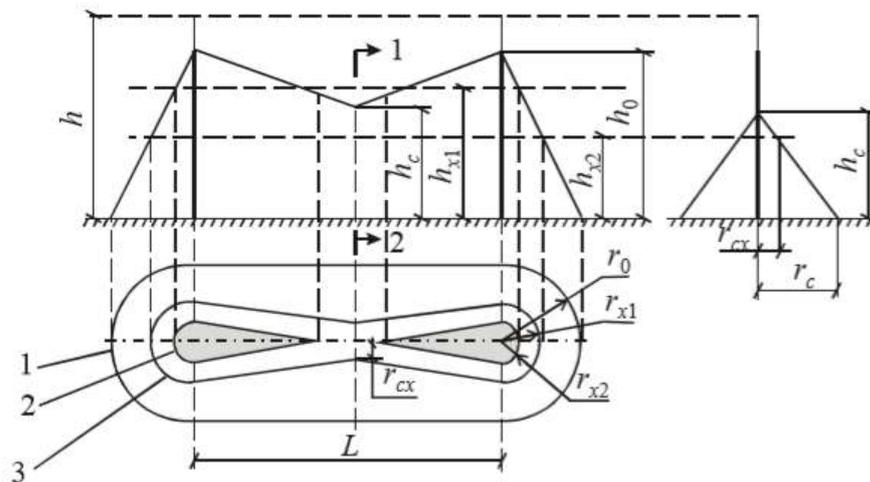
$a + 2r_{cx}$  – длина зоны двойного тросового молниеотвода на уровне защищаемого сооружения;

$a + 2r_c$  – длина зоны двойного тросового молниеотвода на уровне земли.

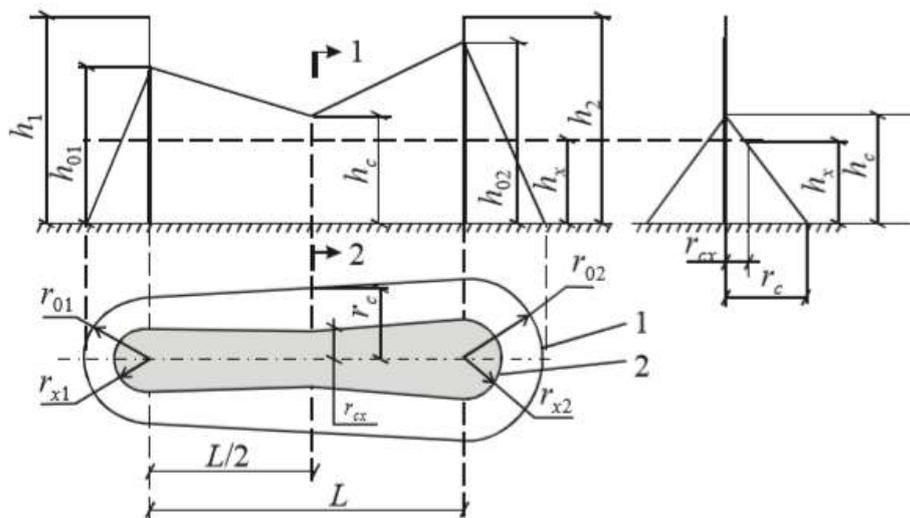
2. Для одиночного тросового молниеотвода  $h$  – высота троса в середине пролета. С учетом провеса троса сечением 35–50 мм<sup>2</sup> при известной высоте опор  $h_{оп}$  и длине пролета  $a$  высота троса (в метрах) определяется:

$h = h_{оп} - 2$  – при  $a \leq 120$  м,

$h = h_{оп} - 3$  – при  $120 < a \leq 150$  м.



1 – граница зоны защиты на уровне земли; 2 – то же на уровне  $h_{x1}$ ; 3 – то же на уровне  $h_{x2}$   
Рисунок 1.86 – Зона защиты двойного стержневого молниеотвода высотой до 150 м



1 – граница зоны защиты на уровне земли; 2 – то же на уровне  $h_x$

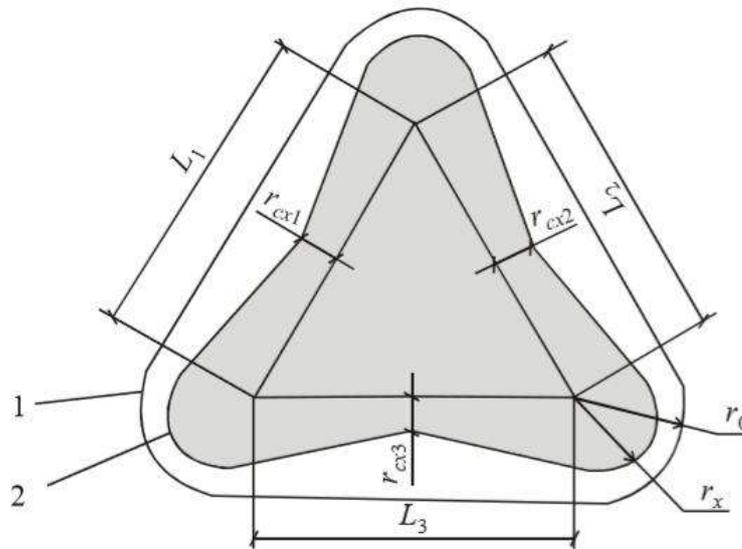
Рисунок 1.87 – Зона защиты двух стержневых молниеотводов разной высоты

### 1.14.3.5 Определение надежности защиты подстанций от прямых ударов молнии

Молниезащита отсутствует. Число ударов молнии в подстанцию в год может быть определено по формуле:

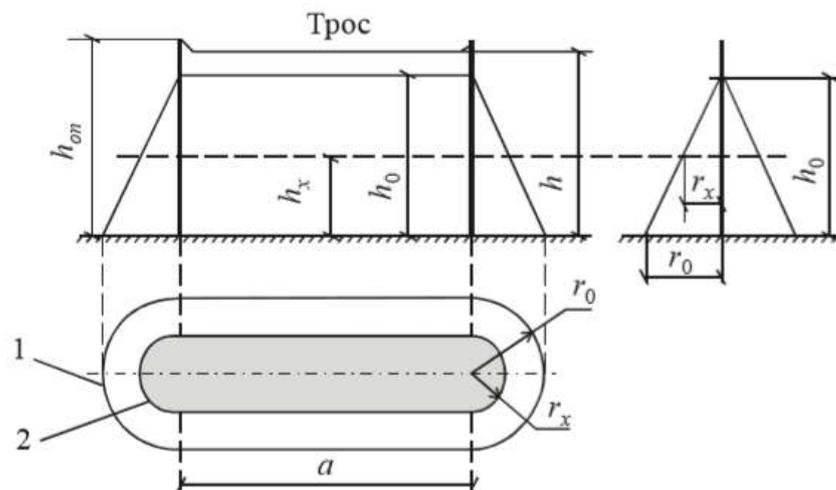
$$N_1 = 0,06n(B + 10h_x)(A + 10h_x) \cdot 10^{-6}, \quad (1.35)$$

где  $h_x$  – наибольшая высота сооружения на подстанции, м;  $A$  и  $B$  – длина и ширина объекта, м (если объект имеет сложную конфигурацию, то  $A$  и  $B$  – это стороны прямоугольника, в который вписывается на плане защищаемый объект);  $n$  – число грозových часов в году (определяется по картам, составленным на основании метеосводок).



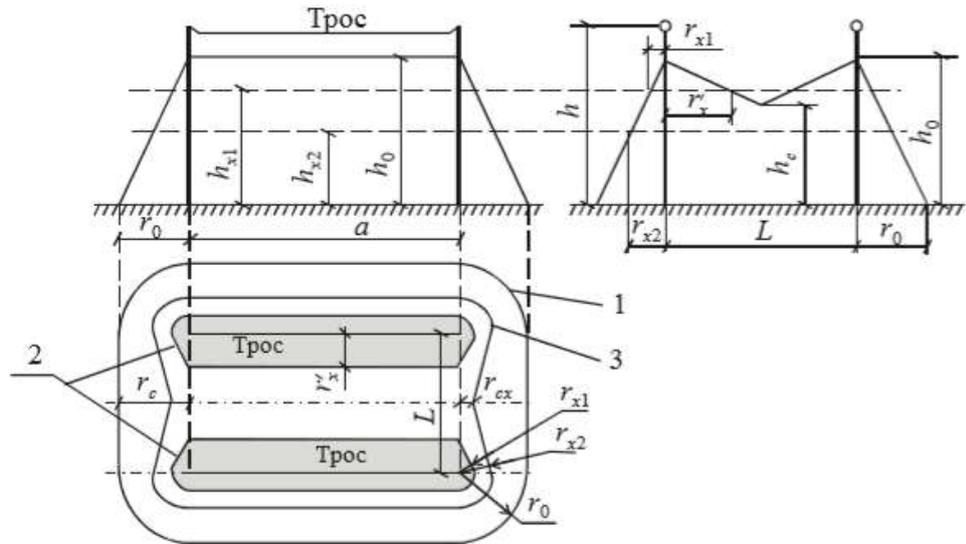
1 – граница зоны защиты на уровне земли; 2 – то же на уровне  $h_x$

Рисунок 1.88 – Зона защиты (в плане) многократного стержневого молниеотвода



1 – граница зоны на уровне земли; 2 – то же на уровне  $h_x$

Рисунок 1.89 – Зона защиты одиночного тросового молниеотвода.



1 – граница зоны защиты на уровне земли; 2 – то же на уровне  $h_{x1}$ ; 3 – то же на уровне  $h_{x2}$   
 Рисунок 1.90 – Зона защиты двойного тросового молниеотвода

Считая (с некоторым запасом), что все удары молнии поражают токоведущие части подстанции, получим вероятное число отключений в год от прямых ударов молнии:

$$\gamma_1 = N_1 \psi_i \psi_g, \quad (1.36)$$

где  $\psi_i = 0,68$  – вероятность перекрытия изоляции при прямом ударе молнии,  $\psi_g = 0,70$  – вероятность перехода импульсного перекрытия в силовую дугу. Вероятное число лет работы подстанции без отключений от ПУМ составляет:

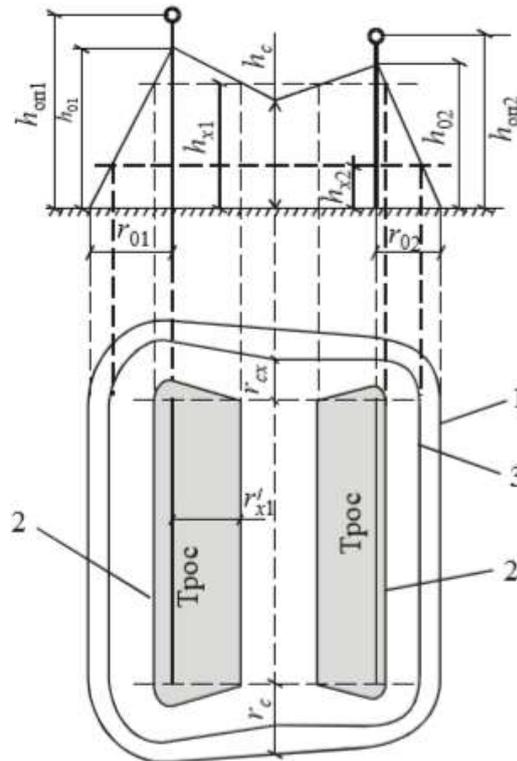
$$m_1 = \frac{1}{\gamma_1}. \quad (1.37)$$

Подстанция защищена молниеотводами. Число ударов молнии в подстанцию в год  $N_2$  определяется по выражению (1.35), в котором  $h_x$  принимается равным высоте молниеотвода  $h$ , при этом число отключений подстанции в год составит:

$$\gamma_2 = N_2 \psi_n \psi_i \psi_g. \quad (1.38)$$

где  $\psi_n = 10^{-3}$  – вероятность прорыва молнии сквозь зону защиты молниеотводов. Вероятное число лет работы подстанции без отключений от ПУМ:

$$m_2 = \frac{1}{\gamma_2}. \quad (1.39)$$



1 – граница зоны защиты на уровне земли; 2 – то же на уровне  $h_{x1}$ ; 3 – то же на уровне  $h_{x2}$   
 Рисунок 1.91 – Зона защиты двух тросовых молниеотводов разной высоты

### 1.14.3.6 Задачи для решения

Рассчитать молниезащиту – это значит определить тип защиты, ее зону, параметры и ожидаемое количество поражений объекта молнией в год. По типу молниезащита может быть: одностержневой, двухстержневой одинаковой или разной высоты, многократной стержневой, одиночной тросовой, многократной тросовой. По степени надежности защиты различают два типа зон: □А – степень надежности защиты  $\geq 99,5\%$ , □Б – степень надежности защиты 95–99,5%. Расчет защитных зон молниеотводов выполняется по соотношениям, приведенным в таблице 1.21. Параметры молниезащиты перечислены в её примечании 1. Некоторые из них заданы в проектах на объект, другие рассчитываются по соотношениям этой таблицы. Надежность защиты объектов определяется по выражениям (1.35)–(1.39).

**Задача 1.** Для одиночного стержневого молниеотвода высотой  $h = 50$  м определить параметры зон защиты, длину защищаемого объекта при высоте  $h_x = 20$  м и ширине  $B = 20$  м, его возможную поражаемость. Число грозových

часов в году составляет  $n = 50$  ч/год. Проверить правильность расчетов и при необходимости скорректировать зоны защиты.

**Решение.** По выражениям таблицы 1.21 для одиночного стержневого молниеотвода определим параметры молниезащиты для зон *A* и *B*.

Зона *A*.

$$h_0 = 0,85h = 0,85 \cdot 50 = 42,5\text{м}; r_0 = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3}h)h = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 50) \cdot 50 = 50\text{м};$$

$$r_x = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3}h)(h - 1,2h_x) = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 50) \cdot (50 - 1,2 \cdot 50) = 26\text{м};$$

$$h_m = h - h_0 = 50 - 42,5 = 7,2\text{м}; h_a = h - h_x = 50 - 20 = 30\text{м};$$

$$\alpha^{(A)} = \arctg \frac{r_0}{h_0} = \arctg \frac{50}{42,5} = 49,6^\circ.$$

Зона *B*.

$$h_0 = 0,92h = 0,92 \cdot 50 = 46\text{м}; r_0 = 1,5h = 1,5 \cdot 50 = 75\text{м};$$

$$r_x = 1,5(h - 1,1h_x) = 1,5 \cdot (50 - 1,1 \cdot 20) = 42\text{м};$$

$$h_m = h - h_0 = 50 - 46 = 4\text{м}; h_a = h - h_x = 50 - 20 = 30\text{м};$$

$$a^{(B)} = \arctg \frac{r_0}{h_0} = \arctg \frac{75}{46} = 58^\circ.$$

Полученные зоны молниезащиты приведены (в масштабе) на рисунке 1.92.

Далее определим габаритные размеры защищаемого объекта в каждой зоне молниезащиты. Для этого на расстоянии  $B/2$  от средней линии параллельно проводится линия до пересечения с окружностью  $r_x$  (рисунок 1.92).

Зона *A*.

$$\varphi^{(A)} = \arctg \frac{B}{2r_x^{(A)}} = \arcsin \frac{20}{2 \cdot 26} = 22,6; \cos \varphi^{(A)} = \cos 22,6^\circ = 0,92;$$

$$A^{(A)} = 2r_x^{(A)} \cos \varphi^{(A)} = 2 \cdot 26 \cdot 0,92 = 48\text{м}; A \times B \times H = 48 \times 20 \times 20\text{м}.$$

Зона *B*.

$$\varphi^{(B)} = \arcsin \frac{B}{2r_x^{(B)}} = \arcsin \frac{20}{2 \cdot 42} = 13,8^\circ;$$

$$\cos \varphi^{(B)} = \cos 13,8^\circ = 0,97; A^{(B)} = 2r_x^{(B)} \cos \varphi^{(B)} = 2 \cdot 42 \cdot 0,97 = 81,6\text{м}.$$

$$\text{Принимается } A = 81\text{м}; A \times B \times H = 81 \times 20 \times 20\text{м}.$$

Определим возможную поражаемость защищаемого объекта в зонах при отсутствии молниезащиты.

$$N_{A1} = 0,06n(A^{(A)} + 10h_x)(B + 10h_x) \cdot 10^{-6} =$$

$$= 0,06 \cdot 50(48 + 10 \cdot 20)(20 + 10 \cdot 20) \cdot 10^{-6} = 0,164;$$

$$\gamma_{A1} = N_{A1}\psi_i\psi_g = 0,164 \cdot 0,68 \cdot 0,70 = 7,81 \cdot 10^{-2};$$

$$m_{A1} = \frac{1}{\gamma_{A1}} = 12,81 \text{ лет.}$$

$$N_{B1} = 0,06n(A^{(B)} + 10h_x)(B + 10h_x) \cdot 10^{-6} =$$

$$= 0,06 \cdot 50(81 + 10 \cdot 20)(20 + 10 \cdot 20) \cdot 10^{-6} = 0,185;$$

$$\gamma_{B1} = N_{B1}\psi_i\psi_g = 0,185 \cdot 0,68 \cdot 0,70 = 8,81 \cdot 10^{-2};$$

$$m_{B1} = \frac{1}{\gamma_{B1}} = 11,36 \text{ лет.}$$

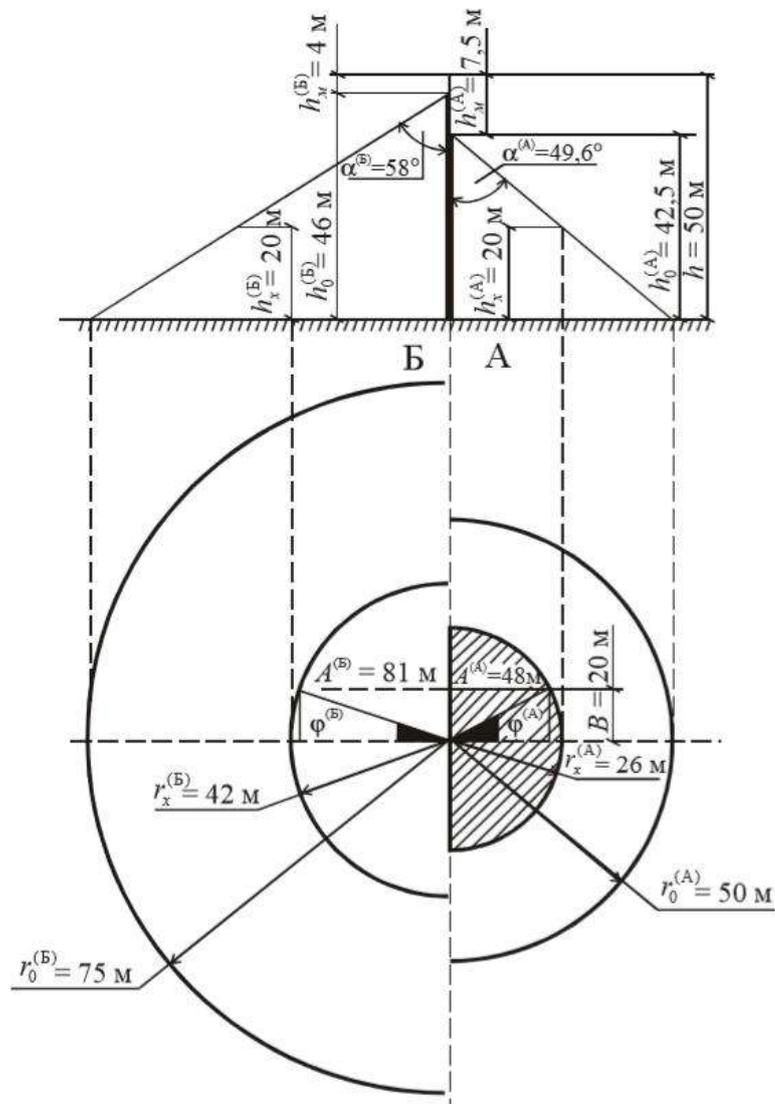


Рисунок 1.92 – Зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода,  $h = 50$  м

Далее определим возможная поражаемость защищаемого объекта в зонах

при наличии молниеотвода.

$$\begin{aligned} N_{A2} &= 0,06n(A^{(A)} + 10h)(B + 10h) \cdot 10^{-6} = \\ &= 0,06 \cdot 50(48 + 10 \cdot 50)(20 + 10 \cdot 50) \cdot 10^{-6} = 0,855; \\ \gamma_{A2} &= N_{A2}\Psi_n\Psi_i\Psi_g = 0,855 \cdot 10^{-3} \cdot 0,68 \cdot 0,70 = 4,07 \cdot 10^{-4}; \\ m_{A2} &= 1/\gamma_{A2} = 2457 \text{ лет.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{B2} &= 0,06n(A^{(B)} + 10h)(B + 10h) \cdot 10^{-6} = \\ &= 0,06 \cdot 50(81 + 10 \cdot 50)(20 + 10 \cdot 50) \cdot 10^{-6} = 0,906; \\ \gamma_{B2} &= N_{B2}\Psi_n\Psi_i\Psi_g = 0,906 \cdot 10^{-3} \cdot 0,68 \cdot 0,70 = 4,31 \cdot 10^{-4}; \\ m_{B2} &= 1/\gamma_{B2} = 2318 \text{ лет.} \end{aligned}$$

Поскольку зоны защиты построены с запасом, то фактически значения  $m_{A2}$  и  $m_{B2}$  еще больше расчетных.

**Задача 2.** Для ГПП, план и расположение оборудования которой приведены на рисунке 1.93, определить параметры зоны молниезащиты (степень надежности 95%) и ее возможную поражаемость. Подстанция защищена четырьмя установленными на порталах молниеотводами. Число грозových часов в году  $n = 50$  ч/год. Требуется проверить расчеты и при необходимости на плане ГПП скорректировать зону защиты на уровне  $h_x$ .

### Решение.

Сначала выберем высоты молниеотводов. ОРУ подстанции подстанции имеет следующие габаритные размеры: высота наиболее высокого объекта  $h_x$  составляет 5,5 м (вентильный разрядник, поз. №7), ширина  $b = 32$  м, длина  $a = 38,5$  м. Расстояние между ближними молниеотводами  $l_1 = 20$  м, между удаленными –  $l_2 = 27,75$  м. Предельное расстояние между молниеотводами (рисунок 1.84) определяется по соотношению:

$$L = \sqrt{l_1^2 + l_2^2} = \sqrt{20^2 + 27,75^2} = 34,2 \text{ м.}$$

Для молниеотводов высотой  $h \leq 30$  м условие защиты всей площади имеет вид:  $L \leq 8(h - h_x) \leq 8h_a$ . Из этого соотношения превышение высоты молниеотводов  $h_a$

над высотой защищаемого объекта  $h_x$  должно составлять:  $h_a \geq \frac{L}{8} = \frac{34,2}{8} = 4,28 \text{ м.}$

Полная высота типового молниеотвода КТПБ:  $h = h_x + h_a = 5,5 + 5,5 = 11$  м, при этом  $L = 34,2$  м  $< 8h_a = 8 \cdot 5,5 = 44$  м. Данные молниеотводы должны обеспечить защиту всей площади ОРУ подстанции от прямых ударов молнии.

Определение границ зоны защиты. Для многократных стержневых молниеотводов зона защиты строится посредством попарно взятых соседних стержневых молниеотводов. Высота вершины конуса стержневого молниеотвода  $h_0$  и радиусы защиты на уровне земли  $r_a$  и на высоте защищаемого объекта  $r_x$  определяется как для одиночного стержневого молниеотвода (таблица 1.21):

$$h_0 = 0,92h = 0,92 \cdot 11 = 10,12 \text{ м};$$

$$r_x = 1,5(h - 1,1h_x) = 1,5 \left( h - \frac{h_x}{0,92} \right) = 1,5 \left( 11 - \frac{5,5}{0,92} \right) = 7,53 \text{ м};$$

$$r_0 = 1,5h = 1,5 \cdot 11 = 16,5 \text{ м}.$$

Высота средней части попарно взятых молниеотводов:

$$h_{\min 1} = h_{c1} = h_0 - 0,14(l_1 - h) = 10,12 - 0,14(20 - 11) = 9,63 \text{ м};$$

$$h_{\min 2} = h_{c2} = h_0 - 0,14(l_2 - h) = 10,12 - 0,14(27,75 - 11) = 8,54 \text{ м}.$$

Ширина средней части зоны попарно взятых молниеотводов на уровне земли составляет:

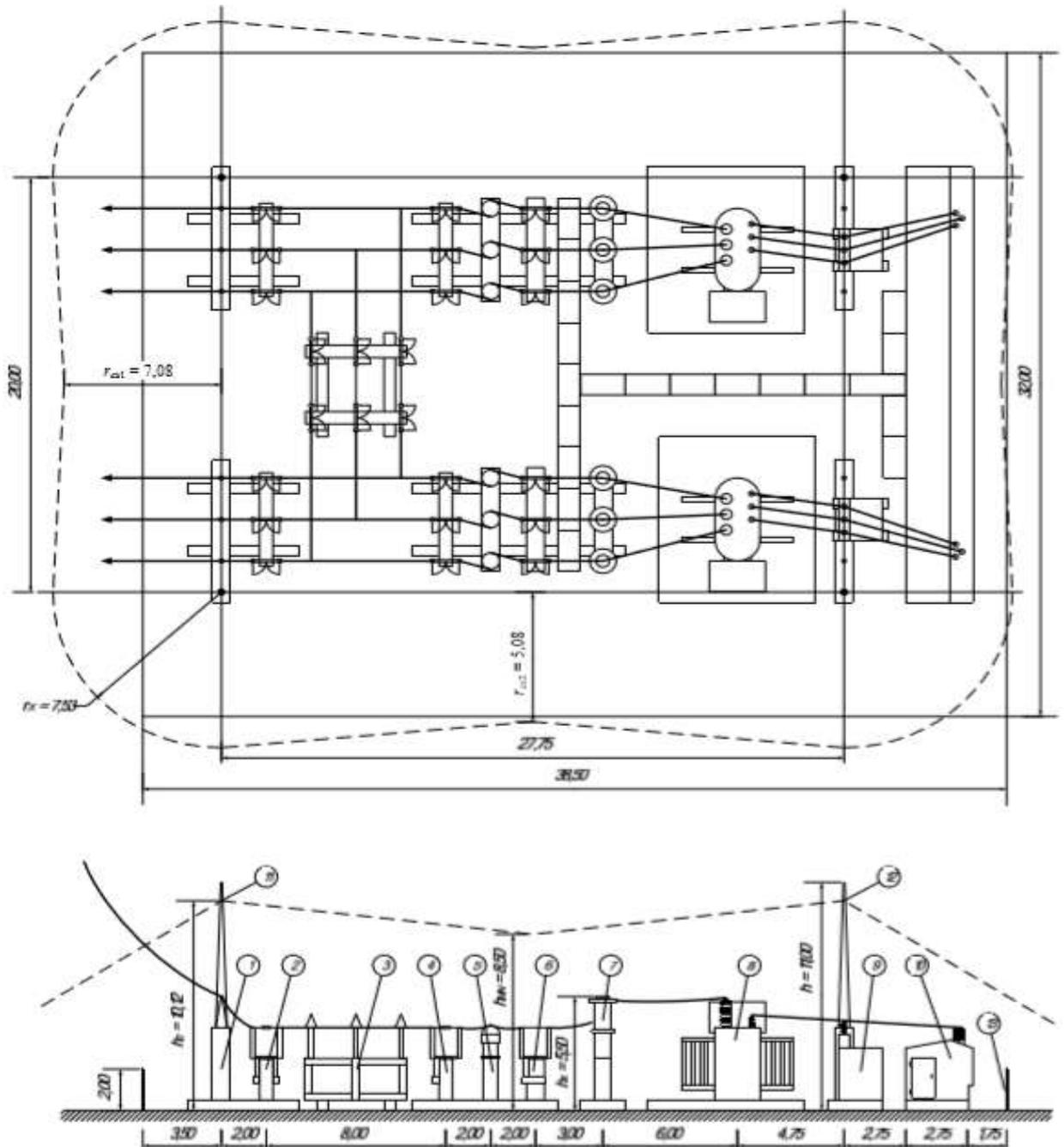
$$r_0 = r_0 = 1,5h = 1,5 \cdot 11 = 16,5 \text{ м},$$

а на уровне высоты защищаемого объекта:

$$r_c = r_0 \frac{h_{c1} - h_x}{h_{c1}} = 16,5 \frac{9,63 - 5,5}{9,63} = 7,08 \text{ м};$$

$$r_{cx2} = r_0 \frac{h_{c1} - h_x}{h_{c2}} = 16,5 \frac{8,54 - 5,5}{8,54} = 5,88 \text{ м}.$$

Полученные параметры молниезащиты наносятся на план подстанции, рисунок 1.93. Видно, что защищаемый объект попадает в зону молниезащиты, то есть четыре молниеотвода высотой  $h = 11$  м обеспечивают защиту подстанции от прямых ударов молнии.



№ поз.	Наименование	Кол.
1	Блок приема ВЛ-110 кВ	2
2	Разъединитель РНДЗ-2-110/1000-ХЛ1	2
3	Разъединитель РНДЗ-1-110/1000-ХЛ1	2
4	Разъединитель РНДЗ-1-110/1000-ХЛ1	2
5	Блок трансформаторов тока ТФЗМ-110	2
6	Блок отделитель-короткозамыкатель	2
7	РазрядникРВС-110-ХЛ1	
8	Трансформатор силовой ТДН-16000/110	2
9	ТСН ТМ-630-10/0,4	2
10	КРУН 10 кВ из шкафов серии К-59	17
11,12	Молниеотвод	4
13	Ограждение	

Рисунок 1.93 – План и зона молниезащиты ОРУ ГПП

Далее определим надежность защиты подстанции от ПУМ. Число ударов молнии в подстанцию в год определяется по соотношению (1.35):

$$N = 0,06n(a + 10h)(b + 10h) \cdot 10^{-6} = \\ = 0,06 \cdot 50(38,5 + 10 \cdot 11)(32 + 10 \cdot 11) \cdot 10^{-6} = 0,063.$$

Число отключений подстанции по соотношению (1.38) составит:

$$\gamma = N \cdot \psi_n \cdot \psi_i \cdot \psi_g = 0,063 \cdot 10^{-3} \cdot 0,68 \cdot 0,70 = 0,3 \cdot 10^{-4},$$

а показатель грозоупорности:

$$m = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{0,3 \cdot 10^{-4}} = 3,3 \cdot 10^4 \text{ лет.}$$

### 1.14.3.7 Заземление молниеотводов

Отдельно стоящие молниеотводы имеют обособленное заземление, электрически не связанное с заземляющим устройством подстанции. Нормированные значения сопротивления стационарных заземлений электроустановок приведены в таблицах 1.22 и 1.23.

Таблица 1.22 – Допустимые сопротивления защитных и рабочих заземлений для электроустановок напряжением выше 1000 В и устройств грозозащиты

Характеристика заземляемого объекта	Сопротивление заземления, Ом, не более
Установки с эффективно заземленной нейтралью	0,5
Установки с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов замыкания на землю, включая опоры воздушных линий 3–35 кВ с установленным электрооборудованием: – для ЗУ, используемого совместно для электроустановок до и выше 1000 В; – для ЗУ, используемого только для электроустановок выше 1000 В	125/I <sub>з</sub> (не более 4 Ом) 250/I <sub>з</sub> (не более 10 Ом)
Отдельно стоящий молниеотвод	25
Опоры воздушных линий (ВЛ) всех напряжений металлические, железобетонные и деревянные, на которых подвешен трос и установлены устройства грозозащиты; опоры ВЛ напряжением 110 кВ и выше с установленным электрооборудованием; опоры металлические и железобетонные ВЛ напряжением 35 кВ и такие же опоры воздушных линий 3–20 кВ в населенной местности при удельном сопротивлении грунта ρ, Ом·м:	
до 100	10
100 – 500	15
500 – 1000	20

1000 – 5000	30
более 5000	$6 \cdot 10^{-3} \rho$
Опоры металлические и железобетонные воздушных линий 3–20 кВ в ненаселенной местности при удельном сопротивлении грунта, Ом·м:	
до 100	30
более 100	0,3ρ
Разрядники и защитные промежутки на подходах ВЛ к подстанциям с вращающимися электрическими машинами	
	5

Примечания.

1.  $I_3$  – расчетный ток замыкания на землю.

2. Для электроустановок сопротивление заземления определяется с учетом естественных заземлителей.

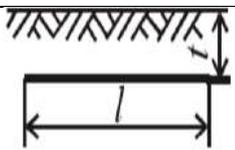
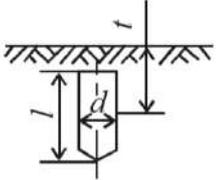
Для расчета сопротивления заземления одиночного стержневого молниеотвода используются выражения таблицы 1.24. Сопротивление железобетонного фундамента, используемого в качестве естественного заземлителя, рассчитывается по соотношениям таблицы 1.25.

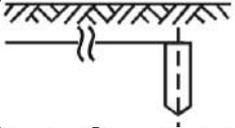
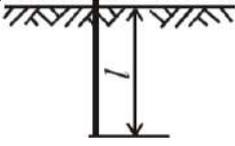
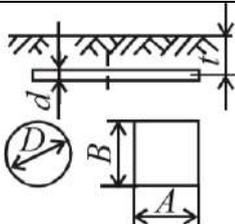
Таблица 1.23 – Наибольшие допустимые значения сопротивления заземляющих устройств для трехфазных сетей напряжением до 1000 В

Напряжение сети, кВ	Режим нейтрали	Наибольшее $R_{3у}$ , Ом	Вид заземляющего устройства
0,66 0,38 0,22	Глухозаземленная нейтраль	2 4 8	Зануление
0,66 0,38 0,22	Изолированная нейтраль	$125/I_3$ (не более 4 Ом)	Заземление

Примечание. При удельном электрическом сопротивлении грунта более 100 Ом·м допускается увеличивать указанные выше значения в 0,01ρ раз, но не более 10-кратного.

Таблица 1.24 – Сопротивление растеканию единичных искусственных заземлителей

Единичный заземлитель	Эскиз	Расчетная формула	Примечание
Горизонтальный луч		$R_{л} = \frac{\rho_{расч}}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{l}{2t} \right),$ $R_{л} = \frac{\rho_{расч}}{\pi l} \ln \frac{1,5l}{\sqrt{bt}}$	$d$ – диаметр заземлителя, $b$ – ширина полосы
Вертикальный трубчатый или стержневой заземлитель		$R_{л} = \frac{\rho_{расч}}{\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{2t + l/2}{2t - l/2} \right)$ <p style="text-align: center;">S</p> $t$ – от поверхности земли до середины электрода	Для угловой стали $d = 0,95b$ , $b$ – ширина уголка

Луч – трубчатый электрод		$R = \frac{R_l R_{mp}}{R_l + R_{mp}} \frac{1}{\eta}$	$\eta$ – коэффициент использования заземлителей
Вертикальный электрод, спускаемый в скважину		$R_{BЭ} = \frac{\rho_{расч}}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	$d$ – диаметр заземлителя
Кольцевой или прямоугольный контур		$R_K = \frac{\rho_{расч}}{2\pi^2 D_э} \left( \ln \frac{8D_э}{d} + \ln \frac{\pi D_э}{4t} \right)$	Для кольца $D_э = D$ , $D_э = \sqrt{\frac{4AB}{\pi}}$ , где $A, B$ – стороны прямоугольника

Примечания.

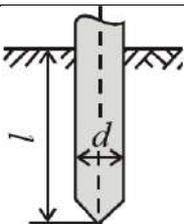
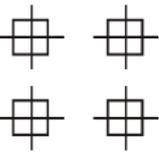
1. Глубина укладки заземлителей в обычных условиях составляет 0,5–0,8 м и определяется глубиной высыхания грунта в течение грозового периода.
2. Все соединения в подземной части выполняются сваркой.
3. Для вертикальных электродов рекомендуется выбирать стальные трубы диаметром 30–60 мм и длиной 2–3 м, а для горизонтальных – стальную ленту толщиной не менее 4 и шириной 20–40 мм или круглую сталь диаметром 10–20 мм.

Расчетное значение удельного сопротивления грунта  $\rho_{расч}$  определяется по данным измерений:

$$\rho_{расч} = k_{сез} \rho, \quad (1.40)$$

где  $k_{сез}$  – сезонный коэффициент (таблица 1.26),  $\rho$  – измеренное значение удельного сопротивления грунта. Ориентировочные значения удельного сопротивления некоторых грунтов приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.25 – Сопротивление растеканию железобетонных фундаментов, используемых в качестве естественных заземлителей

Наименование естественного заземлителя	Геометрические размеры	Схема расположения	Расчетная формула		Примечание
			Сопротивление одного фундамента (свая или подожник)	Сопротивление всего фундамента	
Свайный фундамент			$R_{св} = \frac{1,75 \rho_{расч}}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	$R_1 = \frac{R_{св}}{n\eta}$	$n$ – количество элементов; $\eta$ – коэффициент использования заземлителей

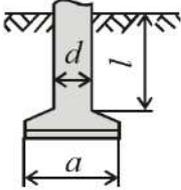
Сборный железобетонный фундамент			$R_{nl} = \frac{1,75\rho_{расч}}{2D_э}$ $R_{см} = \frac{1,75\rho_{расч}}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$ $R_{нодн} = \frac{R_{nl}R_{см}}{R_{nl} + R_{см}} \frac{1}{0,9}$	$R_1 = \frac{R_{нодн}}{n\eta}$ <p>Для круга <math>D_э = D</math>, для прямоугольника <math>D_э = \sqrt{\frac{4AB}{\pi}}</math>, где <math>A</math> и <math>B</math> – стороны прямоугольника</p>
----------------------------------	---	--	--	--

Таблица 1.26 – Коэффициент сезонности

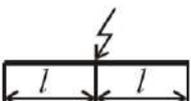
Климатическая зона	Вид заземлителя		Дополнительные сведения
	вертикальный	горизонтальный	
I	1,9	5,8	Глубина заложения вертикальных заземлителей от поверхности земли 0,5–0,7 м
II	1,7	4,0	Глубина заложения горизонтальных заземлителей 0,3–0,8 м
III	1,5	2,3	
IV	1,3	1,8	

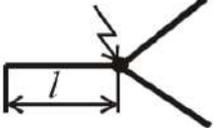
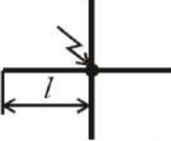
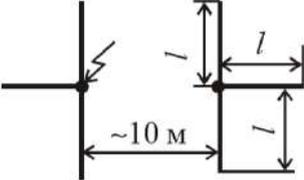
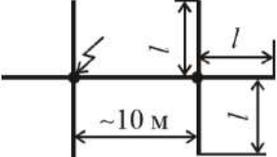
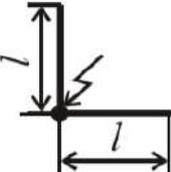
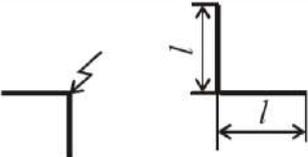
Чтобы удовлетворить требованиям, предъявляемым к заземлению объектов электроэнергетики (таблицы 1.22, 1.23), ЗУ выполняется из большого количества вертикальных и горизонтальных электродов. Вследствие взаимного экранирования электродами друг друга сопротивление одиночных электродов в сложном (составном) заземлителе возрастает. В расчетах это увеличение учитывается введением коэффициента использования заземлителя, который зависит от конструктивного исполнения заземлителя (таблицы 1.27–1.29):

$$R_{з\text{у}} = \frac{R_{расч}}{\eta} = \frac{1}{\eta \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{R_i}}, \quad (1.41)$$

где  $R_{з\text{у}}$ ,  $R_{расч}$  – фактическое и расчетное значения заземляющего устройства,  $\eta$  – коэффициент использования заземлителя,  $R_i$  – расчетное сопротивление элементов, составляющих заземлитель.

Таблица 1.27 – Коэффициент использования типовых лучевых заземлителей

Эскиз заземлителя	Длина луча, м	Коэффициент использования	
		при частоте 50 Гц	при импульсах
	При любой длине	1	1

	10 20 40	0,90 0,93 0,95	0,80 0,83 0,85
	10 20 40	0,75 0,80 0,85	0,65 0,70 0,75
	10 20 40	0,90 0,90 0,90	0,80 0,80 0,80
	10 20 40	0,80 0,83 0,85	0,70 0,73 0,75
	10 20 40	0,93 0,93 0,95	0,83 0,83 0,85
	10 20 40	0,90 0,90 0,90	0,80 0,80 0,80

Естественными заземлителями на подстанциях промышленных предприятий могут служить: заземлители опор линий электропередачи, присоединенные к заземлителю подстанции тросом через линейный портал, металлические оболочки кабелей, водопроводные и другие металлические трубопроводы, металлические конструкции и арматура железобетонных конструкций зданий и сооружений, имеющих соединение с землей. Общее значение сопротивления ЗУ объекта определяется по соотношению:

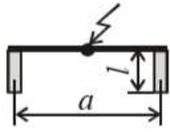
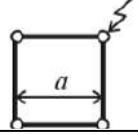
$$R_{\text{ЗУ}} = \frac{R_{\text{иск}} R_{\text{ест}}}{R_{\text{иск}} + R_{\text{ест}}},$$

где  $R_{\text{иск}}$  – сопротивление искусственного заземлителя, а  $R_{\text{ест}}$  – сопротивление естественного заземлителя. При прохождении импульсных токов (токов молнии) через заземлитель создаются специфические условия, которые изменяют его стационарное сопротивление. Это изменение учитывается введением импульсного коэффициента  $\alpha_{\text{имп}}$ :

$$R_{imp} = \alpha_{imp} R,$$

где  $R, R_{imp}$  – стационарное и импульсное сопротивление ЗУ.

Таблица 1.28 – Коэффициент использования вертикальных заземлителей, объединенных горизонтальным электродом

Эскиз заземлителя	$a/l$	Число вертикальных электродов	Коэффициент использования	
			при частоте 50 Гц	при импульсах
	2	2	0,90	0,80
	3	2	0,95	0,85
	2	3	0,85	0,75
	3	3	0,90	0,80
	2	4	0,75	0,65
	3	4	0,80	0,70
	2	3	0,80	0,70
	3	3	0,85	0,75
	2	4	0,75	0,65
	3	4	0,80	0,75

При сильном искрообразовании и небольшой индуктивности (сосредоточенные заземлители) сопротивление заземлителя снижается,  $\alpha_{imp} < 1$ . При большой индуктивности (протяженные заземлители)  $\alpha_{imp} > 1$ . Когда эффект искрообразования компенсирует влияние большой индуктивности на сопротивление заземлителя, коэффициент импульса равен единице. Импульсный коэффициент заземлителей зависит не только от его конструкции и геометрических размеров, но и от удельного сопротивления грунта (таблица 1.30).

Таблица 1.29 – Коэффициенты использования вертикальных  $\eta_B$  и горизонтальные  $\eta_G$  электродов для контурного (числитель) и рядного (знаменатель) заземляющего устройства

Число вертикальных электродов, $N_e$	Отношение расстояния между вертикальными заземлителями ( $a$ ) к их длине ( $l$ ): $a/l$					
	1		2		3	
	$\eta_B$	$\eta_G$	$\eta_B$	$\eta_G$	$\eta_B$	$\eta_G$
4	$\frac{0,69}{0,74}$	$\frac{0,45}{0,77}$	$\frac{0,78}{0,83}$	$\frac{0,55}{0,89}$	$\frac{0,85}{0,88}$	$\frac{0,70}{0,92}$
	$\frac{0,62}{0,63}$	$\frac{0,40}{0,71}$	$\frac{0,73}{0,77}$	$\frac{0,48}{0,83}$	$\frac{0,80}{0,83}$	$\frac{0,64}{0,88}$
10	$\frac{0,55}{0,59}$	$\frac{0,34}{0,62}$	$\frac{0,69}{0,75}$	$\frac{0,40}{0,75}$	$\frac{0,76}{0,81}$	$\frac{0,56}{0,82}$

20	$\frac{0,47}{0,49}$	$\frac{0,27}{0,42}$	$\frac{0,64}{0,68}$	$\frac{0,32}{0,56}$	$\frac{0,71}{0,77}$	$\frac{0,45}{0,68}$
30	$\frac{0,43}{0,43}$	$\frac{0,24}{0,31}$	$\frac{0,60}{0,65}$	$\frac{0,30}{0,46}$	$\frac{0,68}{0,75}$	$\frac{0,41}{0,58}$

Если заземлитель состоит из  $n$  труб или полос, то его импульсное сопротивление равно:

$$R'_{imp} = \frac{\alpha_{imp} R}{\eta_{imp} n} = \frac{1}{\eta_{imp} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{R_{impi}}}, \quad (1.42)$$

где  $\eta_{imp}$  – импульсный коэффициент использования заземлителя, учитывающий ухудшение условий растекания тока молнии вследствие взаимного экранирования электродов (таблицы 1.27–1.29);  $R_{impi}$  – импульсное сопротивление  $i$ -го элемента ЗУ.

Сопротивление заземлителя подстанции в виде сетки, которая состоит из вертикальных электродов, объединенных горизонтальными полосами, рассчитывается по эмпирическому соотношению:

$$R = \rho_{расч} \left( \frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + n \cdot l} \right),$$

где  $L$  – суммарная длина всех горизонтальных заземляющих электродов (полос);  $n$  и  $l$  – число и длина вертикальных электродов;  $S$  – площадь, занятая заземлителем;  $A$  – коэффициент, определяемый по значению  $l/\sqrt{S}$ :

$l/\sqrt{S}$	0	0,02	0,05	0,10	0,20	0,50
$A$	0,44	0,43	0,40	0,37	0,33	0,26

Таблица 1.30 – Значения импульсных коэффициентов  $\alpha_{imp}$  и  $\eta_{imp}$

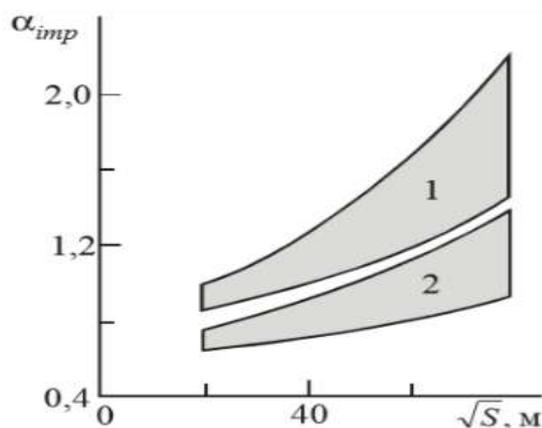
Заземлитель	$\alpha_{imp}$ при удельном сопротивлении грунта, Ом·м				$\eta_{imp}$
	100	200	500	1000	
Вертикальные стержни, соединенные полосой (расстояние между стержнями вдвое больше их длины):					
2–4 стержня	0,50	0,45	0,30	—	0,75
8 стержней	0,70	0,55	0,40	0,30	0,75

15 стержней	0,80	0,70	0,55	0,40	0,75
Две горизонтальные полосы длиной по 5 м, расходящиеся в противоположные стороны от точки присоединения токоотвода	0,65	0,55	0,45	0,40	1,0
Три полосы длиной по 5 м, симметрично расходящиеся от точки присоединения токоотвода	0,70	0,60	0,50	0,45	0,75

Ориентировочные значения коэффициента  $\alpha_{imp}$  для заземлителей в виде сеток приведены на рисунке 1.94. Для протяженных заземлителей ( $\sqrt{S} > 10$  м) импульсный коэффициент можно оценить по приближенной формуле:

$$\alpha_{imp} = \sqrt{\frac{1500\sqrt{S}}{(\rho_{расч} + 320)(I_M + 45)'}}$$

где  $S$  – площадь, м<sup>2</sup>;  $I_M$  – ток молнии, кА. Импульсное сопротивление протяженного заземлителя может быть значительно больше его стационарного значения из-за преобладающего влияния индуктивности над искровым процессом.



зона 1 –  $I_M = 10$  кА; зона 2 –  $I_M = 100$  кА

Рисунок 1.94 – Значения импульсного коэффициента для заземлителей в виде сеток ( $\rho = 100\text{--}600$  Ом·м)

### 1.14.3.8 Расчет заземляющих устройств

При установке стержневых молниеотводов на конструкциях ОРУ, когда заземлителем молниеотвода служит заземляющий контур подстанции, его следует считать протяженным. Для заземления отдельно стоящих

молниеотводов выполняется свое обособленное, не соединенное с контуром подстанции заземление. Оно состоит из небольшого числа вертикальных электродов, объединенных между собой горизонтальной полосовой или круглой сталью.

Для эффективной молниезащиты необходимо заземление с низким сопротивлением растеканию высокочастотного грозового импульса. В качестве таких устройств могут быть рекомендованы глубинные заземлители и заземлители типа Chemrod, разработанных компанией Lightning Eliminators & Consultants, с короткими стержнями большого диаметра со специальным наполнителем. (специальный состав для обеспечения наилучшего контакта заземлителя с грунтом, устраняет проблемы, встречающиеся при применении обычных стержней, позволяя использовать меньшее количество электродов для достижения необходимого сопротивления заземления и тем самым уменьшая требуемую для организации заземления площадь).

Расчет заземляющих устройств в установках с изолированной нейтралью включает:

- определение расчетного тока замыкания на землю  $I_3$  и сопротивления заземляющего устройства  $R_{3у}$ ;
- определение расчетного сопротивления грунта  $\rho_{расч}$ ;
- выбор электродов и расчет их сопротивления;
- уточнение числа вертикальных электродов и конфигурации заземляющего устройства;
- определение импульсного сопротивления заземляющего устройства.

При использовании естественных заземлителей:

$$R_{иск} = \frac{R_{ест} R_{3у}}{R_{ест} - R_{3у}}, \quad (1.43)$$

где  $R_{иск}$ ,  $R_{ест}$  – сопротивление искусственных и естественных заземлителей. Если  $R_{ест} < R_{иск}$ , то искусственных заземлителей не требуется, магистраль заземления не менее чем в двух точках присоединяется к естественному заземлителю.

Сопротивление ЗУ принимается или рассчитывается по соотношениям, приведенным в таблицах 1.22, 1.23. Расчетный ток замыканию на землю приближенно определяется по выражению:

$$I_3 = \frac{U_{ном}(35L_{КЛ} + L_{ВЛ})}{350},$$

где  $U_{ном}$  – номинальное линейное напряжение сети, кВ;  $L_{КЛ}$ ,  $L_{ВЛ}$  – длина кабельных и воздушных электрически связанных линий, км. Если в нейтраль включен заземляющий реактор, то за расчетный ток принимают ток, равный 125% его номинального тока. Расчетный ток замыкания на землю должен быть определен для такой эксплуатационной схемы сети, при которой этот ток имеет наибольшее значение. При совмещении ЗУ различных напряжений принимается  $R_{3У}$  наименьшее из требуемых значений.

Сопротивление одиночных электродов и железобетонных изделий определяется по соотношениям таблиц 1.24 и 1.25, а с учетом коэффициента использования – по выражениям

$$R_г = \frac{R'_г}{\eta_г}; R_г = \frac{R'_г}{\eta_г},$$

где  $R'_г$  и  $R'_г$  – сопротивление вертикального и горизонтального электродов без учета коэффициента использования;  $\eta_г$  и  $\eta_г$  – коэффициенты использования вертикального и горизонтального электрода. Необходимое сопротивление вертикальных заземлителей с учетом соединительной полосы:

$$R_г \leq \frac{R_г R_{3У}}{R_г - R_{3У}}.$$

Уточнение числа вертикальных электродов. Необходимое число вертикальных заземлителей определяется:

- при использовании естественных и искусственных заземлителей:

$$N'_г = \frac{R_г}{R_{иск} \eta_г};$$

- при использовании только искусственных заземлителей:

$$N'_g = \frac{R_g}{R_{3У} \eta_g};$$

- уточненное количество

$$N_g = \frac{R'_g}{R_{иск} \eta_{г.ут.}};$$

где  $\eta_{г.ут.}$  – уточненное значение коэффициента использования вертикальных заземлителей.

Определение импульсного сопротивления. Расчет импульсного сопротивления заземляющего устройства выполняется по соотношению (1.42). По его величине определяются расстояния по воздуху  $S_g$  и в земле  $S_z$  между заземлителем отдельно стоящего молниеотвода и ближайшей к нему точкой защищаемого устройства (см. таблицу 1.18). На подстанциях при установке молниеотводов на порталах кроме соблюдения безопасных расстояний по воздуху и в земле необходимо согласовать импульсные разрядные напряжения изоляторов и напряжения, возникающие в точках их присоединения к portalу при ударах молнии в молниеотвод.

### 1.14.3.9 Задачи для решения

**Задача 1.** С учетом молниезащиты, установленной на элементах ОРУ, рассчитать ЗУ заводской подстанции 35/10 кВ, находящейся в третьей климатической зоне. Сети 35 и 10 кВ работают с незаземленной нейтралью. На стороне 35 кВ расчетный ток замыкания на землю  $I_z$  составляет 8 А, на стороне 10 кВ – 19 А. Собственные нужды подстанции получают питание от трансформатора 10/0,4 кВ с заземленной нейтралью на стороне 0,4 кВ. Естественных заземлителей нет. Удельное сопротивление грунта при нормальной влажности  $\rho = 60$  Ом·м. Электрооборудование подстанции занимает площадь  $(18 \times 8)$  м<sup>2</sup>.

**Задача 2.** Рассчитать заземляющее устройство подстанции 10/0,23 кВ, находящейся в первой климатической зоне. Сеть 10 кВ состоит из воздушной и кабельной линий длиной по 5 км и работает с незаземленной нейтралью.

Трансформатор на стороне 0,23 кВ имеет заземленную нейтраль. Естественных заземлителей нет. Удельное сопротивление грунта при нормальной влажности  $\rho = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Заземляющее устройство – рядное, выполненное стальными вертикальными электродами диаметром 16 мм и длиной 5 м, горизонтальная связывающая полоса  $(40 \times 4) \text{ мм}^2$  проложена на глубине 0,5 м. Электрооборудование подстанции занимает площадь  $A \times B = 15 \times 12 \text{ м}$  (рисунок 1.95).

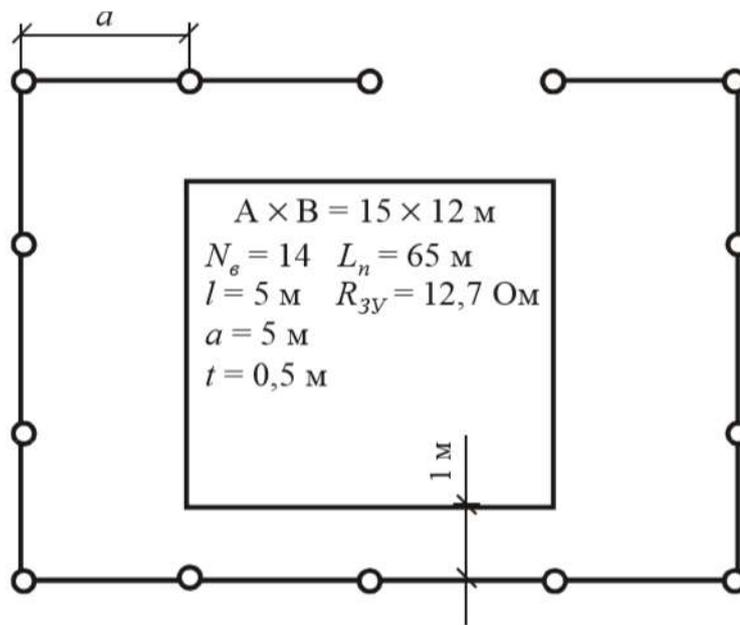


Рисунок 1.95 – План заземляющего устройства трансформаторной подстанции 10/0,23 кВ

Электроустановки 110 кВ и выше работают с эффективно заземленной нейтралью. С целью уменьшения напряжения на заземлителе при однофазном КЗ его сопротивление не должно превышать 0,5 Ом в любое время года (таблица 1.23). Однако при токах короткого замыкания 4–8 кА падение напряжения на заземлителе составит 2–4 кВ, поэтому необходимы мероприятия по выравниванию потенциала внутри заземляющего устройства и быстрое отключение КЗ.

Для выравнивания потенциала на территории, занятой оборудованием, прокладываются продольные заземлители вдоль осей оборудования на глубине 0,5–0,7 м и на расстоянии 0,8–1,0 м от фундаментов и соединяются между собой поперечными заземлителями с расстояниями 4–20 м в зависимости от

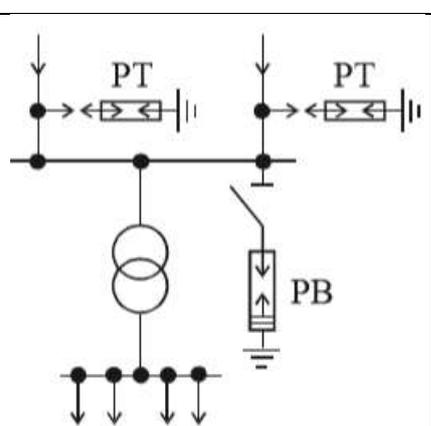
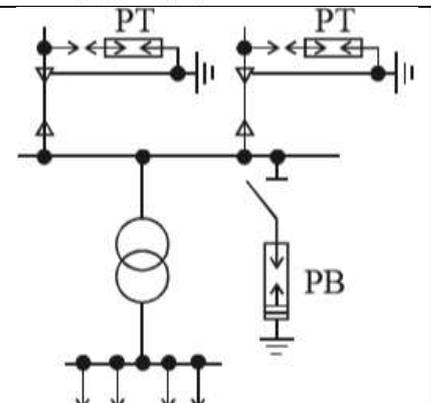
расположения оборудования. Используются естественные заземлители, а при необходимости – вертикальные.

Расчет ЗУ, нормированного по сопротивлению  $R_{3у}$ , производится в таком же порядке, как и для установок с изолированной нейтралью. Обязательным является учет сопротивления сетки заземляющих полос и проверка их сечения по термической стойкости. Расчет может выполняться и по нормам на наибольшее допустимое напряжение на заземляющем устройстве и напряжение прикосновения. Такое заземление обеспечит безопасность персонала и будет удовлетворять требованиям, предъявляемым к рабочим заземлениям и к заземлениям средств грозозащиты.

#### 1.14.4 Схемы молниезащиты подстанций промышленных предприятий

Рекомендуемые схемы молниезащиты подстанций систем электроснабжения промышленных предприятий приведены в таблице 1.31.

Таблица 1.31 – Схемы молниезащиты подстанций

Схема	Защищаемый объект	Характеристики молниезащиты
Напряжение 3–20 кВ		
	Цеховые трансформаторные подстанции и распределительные пункты (РП) с питающими воздушными линиями (ВЛ)	Устанавливают трубчатые разрядники (РТ) на вводе каждой ВЛ. Если токи КЗ больше предельных токов КЗ, отключаемых трубчатыми разрядниками, на шинах подстанции устанавливают вентильные разрядники (РВ)
	Цеховые трансформаторные подстанции и РП с питающими ВЛ через кабельные вставки	Устанавливают РТ или РВ на кабельных муфтах и РВ на шинах подстанции

	<p>Главные понизительные подстанции с отходящими ВЛ на стороне низшего напряжения</p>	<p>Устанавливают РВ на шинах подстанции, РТ<sub>2</sub> – на вводах в подстанцию и дополнительные РТ<sub>1</sub> на расстоянии трех-четырех пролетов от подстанции</p>
	<p>Главные понизительные подстанции с отходящими ВЛ, имеющими кабельные вставки на подходах к подстанции</p>	<p>Устанавливают РВ на шинах подстанции, РВ – за реакторами, РТ<sub>2</sub> – на кабельных муфтах и на расстоянии трех-четырех пролетов от них; при длине кабельной вставки более 50 м второй комплект разрядников РТ<sub>1</sub> не устанавливают</p>
	<p>Генераторы до 50 МВА электростанций промышленных предприятий. ВЛ подключают к шинам через кабельные вставки без реакторов. ВЛ на деревянных опорах к шинам генераторов мощностью более 25 000 кВт·А присоединять не разрешается</p>	<p>Устанавливают РВ I группы на шинах электростанций, РТ или РВ на кабельных муфтах и в конце защищенного молниеотводами подхода; длина кабельной вставки должна быть не менее 50 м. Подход ВЛ на расстоянии 300 м защищают стержневыми молниеотводами. Если подходы ВЛ к электростанции или подстанции экранированы окружающими строениями, защита подходов ВЛ молниеотводами не обязательна</p>
	<p>Генераторы до 50 МВА электростанций промышленных предприятий. Линии реактивированы. ВЛ присоединены к шинам генераторного напряжения через кабельные вставки</p>	<p>Устанавливают РВ I группы на шинах генераторного напряжения, РВ IV группы – за реакторами, на линиях РТ<sub>1</sub>. На шинах электростанции кроме разрядника устанавливают защитные емкости, чтобы суммарная емкость кабелей, присоединенных к генераторам, составляла 0,5 мкФ и более на фазу. Длина кабельной вставки должна быть не менее 50 м</p>

	<p>Главные понизительные подстанции 35–110 кВ</p>	<p>Устанавливают РВ на шинах подстанции, РТ – на вводах и в конце тросовых участков. Подходы ВЛ защищают тросами. Если подходы экранированы окружающими строениями, защита молниеотводами не обязательна.</p> <p>Вилитовые разрядники присоединяют под один разъединитель вместе с трансформаторами напряжения</p>
	<p>Главные понизительные подстанции 35-110 кВ по упрощенной схеме с короткозамыкателями вместо выключателей</p>	<p>Устанавливают РВ без разъединителей</p>
	<p>Цеховые понизительные подстанции глубокого ввода 35 кВ с трансформаторами до 630 кВА</p>	<p>Устанавливают РВ на шинах подстанции, РТ – на вводах в подстанцию и на расстоянии 200 м</p>
	<p>Подстанции насосных установок промышленных предприятий с электродвигателями 3–10 кВ, питающиеся через ВЛ без установки понизительных трансформаторов (не имеющие насосной,</p>	<p>Устанавливают РВ на шинах подстанции и конденсаторы емкостью 0,5 мкФ; на питающих ВЛ устанавливают РТ<sub>2</sub> на расстоянии 150 м от подстанции и РТ<sub>1</sub> на расстоянии 100 м от РТ<sub>2</sub></p>

	например 35/6 кВ) Для всех подстанций, имеющих установленные и присоединенные к шинам батареи конденсаторов, при наличии ввода ВЛ на те же шины	Устанавливают РТ на ВЛ на расстоянии 150–200 м от шин подстанции и РВ – на шинах
--	--	--

### 1.14.5 Молниезащита подходов воздушных линий электропередачи к подстанциям

Защита подходов ВЛ напряжением 3–20 кВ к подстанциям тросовыми молниеотводами не требуется. Схема защиты подходов ВЛ напряжением 3–20 кВ с деревянными опорами приведена на рисунке 1.96. Сопротивление заземления трубчатых разрядников РТ<sub>1</sub> и РТ<sub>2</sub> не должно превышать 10 Ом при удельном сопротивлении земли менее 1000 Ом·м и 15 Ом при  $\rho \geq 1000$  Ом·м. Расстояние от РТ<sub>2</sub> на отключенном от подстанции конце ВЛ до аппаратов не должно быть более 60 м. При подходах ВЛ с металлическими и железобетонными опорами установка РТ<sub>1</sub> и РТ<sub>2</sub> не требуется, опоры ВЛ на длине 200–300 м от подстанции должны быть заземлены.

При мощности трансформатора подстанции до 600 кВА трубчатые разрядники на подходе ВЛ напряжением 3–20 кВ с деревянными опорами не устанавливаются. Схема молниезащиты подходов воздушных линий напряжением 35 кВ и выше приведена на рисунке 1.97. Длина подхода с повышенным защитным уровнем сопротивления заземления опор, количество и защитные углы тросов приведены в таблице 1.321.18.

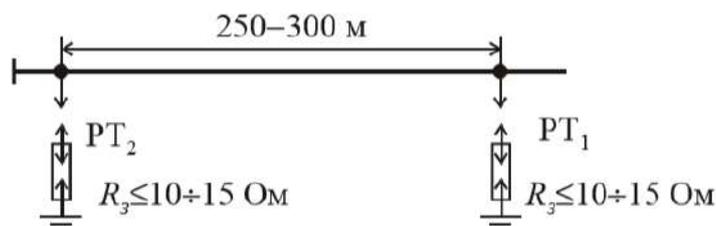


Рисунок 1.96 – Молниезащита подходов ВЛ напряжением 3–20 кВ на деревянных опорах

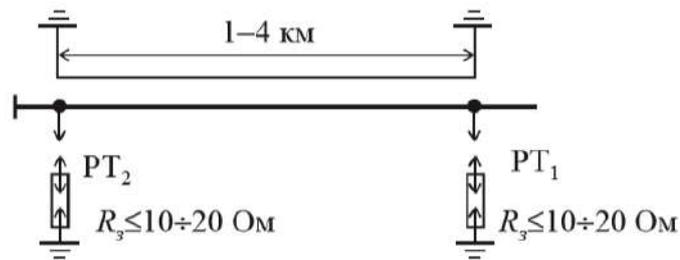


Рисунок 1.97 – Молниезащита подходов ВЛ напряжением 35 кВ и выше

Таблица 1.32 – Требования к подходам воздушных линий электропередачи

Уном, кВ	Подходы ВЛ на порталных опорах			Подходы ВЛ на одностоечных опорах			Наибольшее допустимое сопротивление заземления опор, Ом, при удельном сопротивлении земли, Ом·м <sup>*2</sup>		
	Длина подхода, км <sup>*1</sup>	Количество тросов	Защитный угол троса, град	Длина подхода, км <sup>*1</sup>	Количество тросов	Защитный угол троса, град	до 100	от 100 до 500	более 500
35	0,5*3	2	25–30	1–2	1–2	30	10	15	20
110	1–2								
150	1–3	2	25–30	1–3	1–2	25* <sup>4</sup>	10	15	20* <sup>5</sup>
220	2–3	2	25–30	2–3	1–2	25* <sup>4</sup>	10	15	20* <sup>5</sup>

\*<sup>1</sup> Длина защищаемого подхода выбирается с учетом расстояний между вентильным разрядником и защищаемым оборудованием.

\*<sup>2</sup> На подходах ВЛ напряжением 110–330 кВ с одностоечными двухцепными опорами заземления опор рекомендуется выполнять с сопротивлением не более 5, 10 и 15 Ом при грунтах с эквивалентным удельным сопротивлением до 100, от 100 до 500 и более 500 Ом·м соответственно.

\*<sup>3</sup> Только для подстанций с трансформаторами до 1600 кВА.

\*<sup>4</sup> На одностоечных железобетонных опорах допускается до 30°.

\*<sup>5</sup> Для порталных опор на грунте с эквивалентным удельным сопротивлением более 10<sup>3</sup> Ом·м допускаются сопротивления заземления более 20, но не более 30 Ом.

Комплект разрядников РТ<sub>1</sub> устанавливается на первой, со стороны линии, опоре подхода в следующих случаях:

- линия по всей длине, включая подход, построена на деревянных опорах;
- линия построена на деревянных опорах, подход – на металлических или железобетонных;
- на подходах ВЛ напряжением 35 кВ на деревянных опорах, защита которых выполнена упрощенно.

Комплект разрядников РТ<sub>2</sub> устанавливается на входных порталах или на первой от подстанции опоре ВЛ напряжением 35–110 кВ, которые имеют защиту тросом по всей длине и в грозовой сезон могут быть длительно отключены с одной стороны. Расстояние от РТ<sub>2</sub> до отключенного аппарата не должно превышать 60 м. Допускается увеличение сопротивлений заземления опор на подходах воздушных ЛЭП напряжением 35–110 кВ в районах с числом грозových часов в году менее 20 в полтора раза, меньше 10 – в три раза.

В особо гололедных районах и в районах с эквивалентным удельным сопротивлением земли более  $10^3$  Ом·м допускается защищать подходы ВЛ к ОРУ отдельно стоящими стержневыми молниеотводами, сопротивление заземлителей которых не нормируется. В районах, имеющих не более 60 грозových часов в году, допускается не выполнять защиту тросом подхода ВЛ напряжением 35 кВ к подстанциям 35 кВ с двумя трансформаторами до 1600 кВА и наличием резервного питания нагрузки со стороны низшего напряжения. При этом опоры подхода ВЛ на длине 500 м должны иметь заземлители с сопротивлением, указанным в таблице 1.23. На воздушных линиях с деревянными опорами, кроме того, требуется на подходе длиной 500 м заземлять крепления изоляторов и устанавливать разрядники РТ<sub>1</sub> на первой опоре подхода со стороны ВЛ. Расстояние между вентильными разрядниками и трансформатором должно быть не более 10 м. При отсутствии резервного питания на подстанции с одним трансформатором до 1600 кВА подходы ВЛ напряжением 35 кВ к подстанции должны быть защищены тросом на длине не менее 500 м.

### **1.15 Внутренняя система молниезащиты**

Надежная защита объектов от воздействия любого вида перенапряжений требует создания в первую очередь эффективной системы заземления и выравнивания потенциалов. Желателен переход на системы электропитания TN–S или TN–C–S с разделенными нулевым и защитным проводниками. Этот переход важен как с точки зрения защиты от импульсных перенапряжений, так

и с точки зрения электробезопасности (возможно применение устройств защитного отключения). Кроме системы заземления и выравнивания потенциалов необходима установка защитных устройств. Схема их включения определяется режимом заземления нейтрали в сетях 0,4 кВ.

### **1.15.1 Система уравнивания потенциалов на вводе в здания**

Для эффективной молниезащиты необходимо заземление с низким сопротивлением растеканию грозового импульса. Поскольку протекание тока молнии – процесс высокочастотный, то необходимо обеспечивать приемлемые характеристики заземляющих устройств на высоких частотах. Один из путей улучшения характеристик заземляющих устройств на высокой частоте – применение вертикальных (глубинных) заземлителей. Этим объясняется рекомендация ПУЭ по установке вертикальных заземлителей вблизи объектов молниезащиты на ОРУ подстанций высокого напряжения. Несмотря на то, что на низкой частоте сопротивление вертикального заземлителя длиной 3–5 м много больше общего заземляющего контура ОРУ подстанции (типа "сетки"), при молниевом разряде роль локального заземлителя резко возрастает. Установка нескольких вертикальных или глубинных заземлителей вблизи от заземления молниеприемника обеспечивает значительное снижение импульсных потенциалов на территории объекта, т.к. индуктивное сопротивление установленных глубинных заземлителей минимально, а включаются они фактически параллельно импульсному сопротивлению заземляющей сетки в целом.

Источником опасных полей и помех на объектах могут выступать токи, протекающие по элементам системы заземления. Опыт обследования предприятий показывает, что напряженность импульсного магнитного поля может превышать 1 кА/м внутри помещений даже на существенном удалении от проводника, по которому протекает ток молнии. Такой уровень полей опасен для оборудования и цепей обмена информацией. Ситуация осложняется еще и тем, что пути протекания тока молнии с основания молниеприемников не

известны. В здании протекание токов может происходить по специально выделенным заземляющим проводникам, несущим металлоконструкциям, оболочкам кабелей с антенно-мачтовых устройств и даже РЕ- и N-проводникам системы питания потребителей.

На рассредоточенных объектах большую опасность представляет растекание тока молнии по кабельным каналам и лоткам. Аналогичная ситуация может возникать не только при молниевом разряде. На многих высоковольтных подстанциях конструкция заземляющего устройства такова, что протекание значительной части тока КЗ в сети 110 кВ и выше (с заземленной нейтралью) происходит через другие здания. Это может приводить к нежелательному влиянию поля на размещенное там оборудование и аппаратуру.

Самостоятельной и сложной проблемой является постоянное протекание токов по заземляющему устройству. Обычно это связано с ошибками в организации систем заземления и питания на напряжении 0,4 кВ. Среди порожденных токами утечки нежелательных последствий – повышенный уровень магнитных полей, влияющих на работу аппаратуры и обслуживающего персонала.

Улучшение электромагнитной обстановки на объектах с одновременным выполнением требований по электробезопасности достигается правильным выполнением системы уравнивания потенциалов на вводе в здания. Если здание имеет несколько обособленных вводов, то главная заземляющая шина (ГЗШ) должна быть выполнена для каждого вводного устройства (ВУ) или вводно-распределительного устройства (ВРУ), а при наличии одной или нескольких встроенных трансформаторных подстанций – для каждой подстанции. В качестве ГЗШ может быть использована РЕ-шина ВУ, ВРУ или РУНН, при этом все главные заземляющие шины и РЕ-шины низковольтных комплектных устройств (НКУ) должны соединяться между собой проводниками системы уравнивания потенциалов (магистралью) сечением (с эквивалентной проводимостью), равным сечению меньшей из попарно

сопряженных шин.

Сечение РЕ-шины в вводных устройствах (ВУ, ВРУ) электроустановок зданий и соответственно ГЗШ принимаются по ГОСТ Р 51321.1–2000 (таблица 1.33).

Таблица 1.33 – Сечение РЕ-шин

Сечение фазного проводника $S$ (мм <sup>2</sup> )	Наименьшее сечение РЕ-шины (мм <sup>2</sup> )
до 16 включительно	$S$
от 16 до 35 включительно	16
от 35 до 400 включительно	$S/2$
от 400 до 800 включительно	200
свыше 800	$S/4$

Если ГЗШ установлены отдельно и к ним не подключаются нулевые защитные проводники установки, в том числе PEN- (РЕ) проводники питающей линии, то сечение (эквивалентная проводимость) каждой из отдельно установленных ГЗШ принимается равным половине сечений РЕ-шины наибольшей из всех РЕ-шин, но не менее меньшего из сечений РЕ-шин вводных устройств. Площади поперечного сечения (табл. 3.1) приведены для случая, когда защитные проводники изготовлены из того же материала, что и фазные. Защитные проводники, изготовленные из других материалов, должны иметь эквивалентную проводимость. РЕ-шина НКУ должна проверяться по нагреву по максимальному значению рабочего тока в PEN-проводнике (например, в неполнофазных режимах, возникающих при перегорании предохранителей, при наличии третьей гармоники и т.д.). Для ГЗШ, не являющейся РЕ-шиной НКУ, такая проверка не требуется.

Сечение главных проводников основной системы уравнивания потенциалов должно быть не менее 6 мм<sup>2</sup> по меди, 16 мм<sup>2</sup> по алюминию и 50 мм<sup>2</sup> по стали. Это условие распространяется и на заземляющие проводники, соединяющие ГЗШ с заземлителями защитного заземления и/или рабочего (функционального) заземления (при их наличии), а также с естественными заземлителями.

Сечения проводников основной системы уравнивания потенциалов, используемых для присоединения к ГЗШ металлических труб коммуникаций,

имеющих дополнительную металлическую связь с нейтралью трансформатора и через которые возможно протекание токов короткого замыкания (например, трубопроводы отдельно стоящих насосных, которые питаются от тех же трансформаторов, что и вводы в здание), должны выбираться по термической стойкости.

Присоединение к заземлителю молниезащиты заземляющих проводников основной системы уравнивания потенциалов и заземляющих проводников от естественных заземлителей (при использовании естественных заземлителей в качестве заземлителей системы молниезащиты) должно производиться в разных местах. Если имеется специальный контур заземления молниезащиты, к которому подключены молниеотводы, то такой контур также должен подключаться к ГЗШ.

При наличии в здании нескольких электрических вводов трубопроводные системы и заземлители рекомендуется подключать к ГЗШ основного ввода. Соединения сторонних проводящих частей с ГЗШ могут выполняться: по радиальной схеме, по магистральной схеме с помощью ответвлений, по смешанной схеме. Трубопроводы одной системы, например, прямая и обратная труба центрального отопления, не требуют выполнения отдельных присоединений. Достаточно иметь одно ответвление от магистрали или одну радиальную линию, а прямую и обратную трубу достаточно соединить перемычкой сечением, равным сечению проводника системы уравнивания потенциалов.

Для проведения измерений сопротивления растекания заземляющего устройства на ГЗШ должно быть предусмотрено разборное соединение заземляющего проводника, подключаемого к заземляющему устройству. В качестве проводников основной системы уравнивания потенциалов в первую очередь следует использовать открыто проложенные неизолированные проводники.

Ввод защитных проводников в НКУ класса защиты 2 следует выполнять изолированными проводниками, т.к. РЕ-шина в них выполняется

изолированной. Отдельно устанавливаемые ГЗШ рекомендуется выполнять из стали. В низковольтных комплектных устройствах РЕ-шина, как правило, выполняется медной (допускается выполнять из стали, использование алюминия не допускается). Стальные шины должны иметь металлическое покрытие, обеспечивающее выполнение требований для разборных контактных соединений класса 2. При использовании разных материалов для ГЗШ и для проводников системы уравнивания потенциалов необходимо принять меры по обеспечению надежного электрического соединения.

В местах, доступных только квалифицированному электротехническому персоналу, ГЗШ может устанавливаться открыто. В местах, доступных неквалифицированному персоналу, ГЗШ должна иметь защитную оболочку. Степень защиты оболочки выбирается по условиям окружающей среды, но не ниже IP21.

Главная заземляющая шина на обоих концах должна быть обозначена продольными или поперечными полосами желто-зеленого цвета одинаковой ширины. Изолированные проводники уравнивания потенциалов должны иметь изоляцию, обозначенную желто-зелеными полосами. Неизолированные проводники основной системы уравнивания потенциалов в местах их присоединения к сторонним проводящим частям должны быть обозначены желто-зелеными полосами, например, выполненными краской или клейкой двухцветной лентой. Указания по выполнению основной системы уравнивания потенциалов на вводе в здания должны быть предусмотрены в проектной документации на электроустановку здания.

### **1.15.2 Нормативные документы**

Международной Электротехнической Комиссией (МЭК) разработаны стандарты, в которых изложены принципы защиты зданий и сооружений любого назначения от перенапряжений, позволяющие грамотно проектировать строительные конструкции и системы молниезащиты объекта, рационально размещать оборудование и прокладывать коммуникации. К ним относятся

следующие стандарты:

- • IЕС-61024-1 (1990-04): "Молниезащита строительных конструкций. Часть 1. Основные принципы".
- • IЕС-61024-1-1 (1993-09): "Молниезащита строительных конструкций. Часть 1. Основные принципы. Руководство А: Выбор уровней защиты для молниезащитных систем".
- • IЕС-61312-1 (1995-05): "Защита от электромагнитного импульса молнии. Часть 1. Основные принципы".

В России на сегодняшний день взамен РД 34.21.122-87 "Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений" утверждена и внесена в реестр действующих в электроэнергетике документов "Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций" СО-153-34.21.122-2003 (утверждена приказом Минэнерго России от 30.06.2004 г. №280). В основе новой инструкции – перечисленные выше стандарты МЭК, однако в нее не вошел ряд требований, в том числе к системам молниезащиты взрывоопасных объектов. Принято решение о постепенном издании методических рекомендаций по вопросам, не рассмотренным в настоящей инструкции, в частности, по выбору схем и типов устройств защиты от импульсных перенапряжений для каждой конкретной электроустановки. В следствии этого Госэнергонадзором рекомендовано одновременно пользоваться как этим документом, так и старым РД 34.21.122-87.

### **1.15.3 Зонная концепция молниезащиты**

Упомянутые в предыдущем разделе стандарты формируют зонную концепцию молниезащиты, основные принципы которой:

- применение строительных конструкций с металлическими элементами (арматурой, каркасами, несущими элементами и т.п.), электрически связанными между собой и с системой заземления и образующими

экранирующую среду для уменьшения воздействия внешних электромагнитных влияний внутри объекта («клетка Фарадея»);

- наличие правильно выполненной системы заземления и уравнивания потенциалов;
- деление объекта на условные защитные зоны и применение специальных устройств защиты от перенапряжений;
- соблюдение правил размещения защищаемого оборудования и подключенных к нему проводников относительно другого оборудования и проводников, способных оказывать опасное воздействие или вызывать наводки.

### **1.15.3.1 Зоны молниезащиты**

Наиболее сложная схема системы защиты должна выстраиваться для объектов, которые находятся на открытой местности и имеют в своем составе высокорасположенные элементы конструкции (промышленные здания с высокими трубами, антенно-мачтовые сооружения и т.п.), а также объекты, имеющие воздушные вводы электропитания. Их с большой степенью вероятности может поразить молния. Проще решается вопрос при защите зданий, расположенных в населенных пунктах. В городских условиях ПУМ наиболее вероятен в высотные конструкции промышленных предприятий, ЛЭП, телевизионную вышку или в отдельные наиболее высокие здания.

На объекты токи молний воздействуют прямым или косвенным способом. Чаще проявляются вторичные воздействия: от ударов молнии в удаленные объекты (ЛЭП, подстанции и т.п.), связанные коммуникациями с защищаемым объектом, или от межоблачных разрядов, наводящих импульсные токи в металлических элементах конструкций и коммуникациях.

Железобетонные конструкции зданий, выполняющие функцию естественного заземляющего устройства и имеющие электрическое соединение с системой выравнивания потенциалов, достаточно хорошо экранируют находящееся внутри оборудование от электромагнитных воздействий (клеть

Фарадея, рисунок 1.99а), отводя на землю большую часть тока молнии при прямом попадании в объект (рисунок 1.99б).

Стандарт ИЕС 61312-1 определяет зоны молниезащиты с точки зрения прямого и непрямого воздействия молнии:

- зона  $0_A$  – зона внешней среды объекта, все точки которой могут подвергаться ПУМ (иметь непосредственный контакт с каналом молнии) и воздействию возникающего при этом электромагнитного поля;
- зона  $0_B$  – зона внешней среды объекта, все точки которой не подвергаются воздействию ПУМ, так как находятся в пространстве, защищенном системой внешней молниезащиты. Однако в данной зоне имеется воздействие неослабленного электромагнитного поля;
- зона 1 – внутренняя зона объекта, точки которой не подвергаются воздействию прямого удара молнии. В этой зоне токи во всех токопроводящих частях имеют значительно меньшее значение по сравнению с зонами  $0_A$  и  $0_B$ . Электромагнитное поле также снижено за счет экранирующих свойств строительных конструкций;
- зона 2 и т.д.

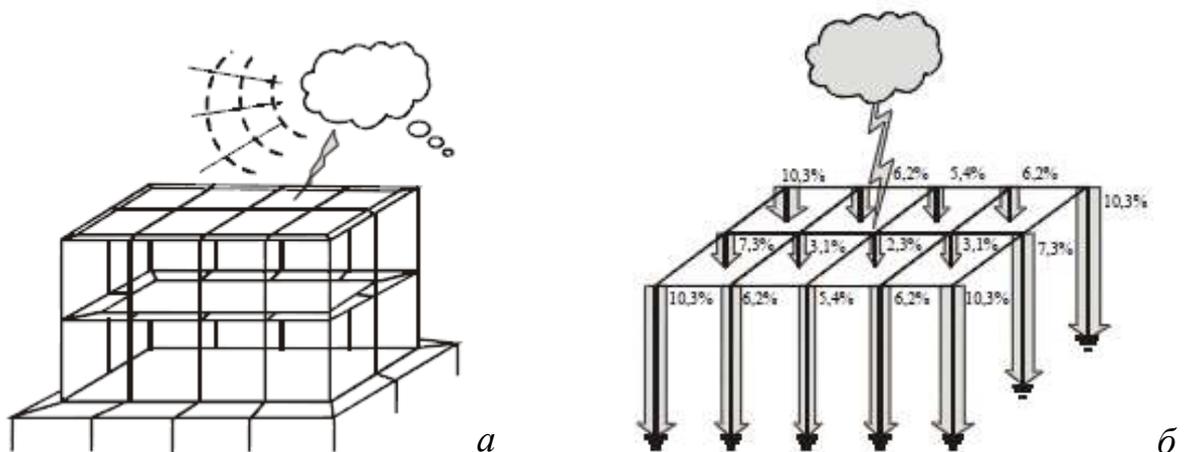


Рисунок 1.99 – Прямой удар молнии: клетка Фарадея (а) и растекание токов по металлоконструкциям (б)

Дальнейшее снижение разрядных токов и/или электромагнитных полей в местах размещения чувствительного оборудования требует проектирования

последующих зон. Критерий для этих зон определяется уровнем ограничения внешних воздействий, влияющих на защищаемую систему. Действует общее правило, по которому с увеличением номера защитной зоны уменьшается влияние электромагнитного поля и грозового тока: на границах раздела отдельных зон необходимо обеспечить последовательное защитное соединение всех металлических частей и их периодический контроль.

Способы образования связей на границах раздела между зонами  $0_A$ ,  $0_B$  и 1 приведены в статье 3.1 стандарта ИЕС 61024-1. На распределение энергии электромагнитных полей внутри объекта влияют различные элементы строительных конструкций (отверстия, щели, обшивки из листовой стали и т.д.), а также места ввода–вывода кабелей электропитания, связи и других коммуникаций. На рисунке 1.100 приведен пример разделения защищаемого объекта на несколько зон. Кабели электропитания, связи и другие коммуникации должны входить в защитную зону 1 в одной точке и своими экранными оболочками или металлическими частями подключаться к главной заземляющей шине на границе раздела зон  $0_A$ – $0_B$  и зоны 1. Разделение объекта на условные зоны позволяет эффективно решать вопросы защиты питающих сетей напряжением до 1000 В, а также линий связи, компьютерных сетей и других коммуникаций объекта с помощью различных устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП).

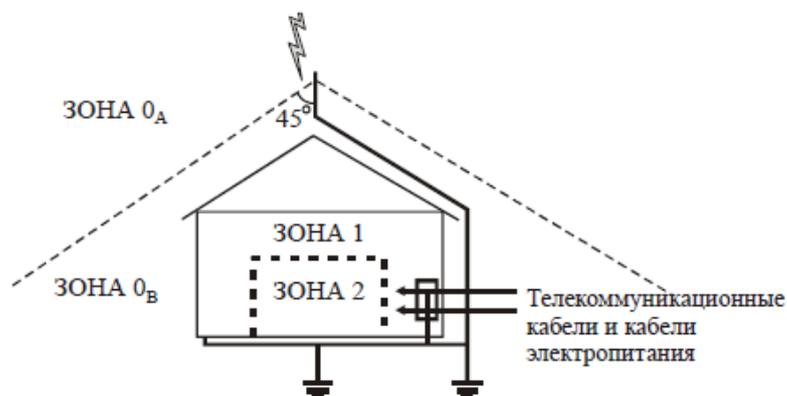


Рисунок 1.100 – Разделение защищаемого объекта на несколько зон

### 1.15.3.2 Требования стандартов МЭК к устройствам защиты от импульсных перенапряжений

Для гарантированной защиты объекта от перенапряжений, возникающих при стекании токов молнии на заземляющее устройство или при "приходе" волны перенапряжения по питающей сети (в случае далекого удара молнии), зонной концепцией защиты предусмотрена трехступенчатая схема включения защитных устройств. Основные классы УЗИП для низковольтных электрических сетей, методики их испытаний и принципы применения приведены в следующих стандартах МЭК:

- IEC 61643-1 (1998): "Устройства защиты от импульсных перенапряжений для низковольтных систем распределения электроэнергии. Часть 11. Требования к эксплуатационным характеристикам и методы испытаний" (введен в действие в виде ГОСТ Р 51992-2002 (МЭК 61643-1-98));
- IEC 61643-12 (2002): "Устройства защиты от импульсных перенапряжений для низковольтных систем распределения электроэнергии. Часть 12. Выбор и принципы применения".

Согласно этим документам устройства защиты от импульсных перенапряжений в зависимости от места установки и способности пропускать через себя различные импульсные токи делятся на классы I, II и III (или B, C и D в немецком стандарте E DIN VDE 0675-6 (1989-11)). Основные требования к УЗИП разных классов приведены в таблице 1.34.

Тип применяемых УЗИП и схема их установки выбираются исходя из оценки риска ПУМ или наводок от удаленного разряда. На выбор защиты от грозовых перенапряжений влияют:

- Интенсивность ударов молнии в данном месте  $N_g$  (среднее годовое количество ударов молнии на  $1 \text{ км}^2$  за год).
- Оценка уязвимости самой установки (например, подземные системы электропитания считаются менее уязвимыми, чем воздушные).

- Стоимость оборудования, подключенного к защищаемой электроустановке (данный фактор может стать важным критерием для усложнения или упрощения схемы защиты).

Таблица 1.34 – Основные требования к УЗИП разных классов

Класс	Назначение
I(B)	Предназначены для защиты от прямых ударов молнии в систему молниезащиты здания (объекта) или воздушную линию электропередач. Устанавливаются на вводе в здание во вводно-распределительном устройстве (ВРУ) или главном распределительном щите (ГРЩ). Нормируются импульсным током $I_{imp}$ с формой волны 10/350 мкс.
II(C)	Предназначены для защиты токораспределительной сети объекта от коммутационных помех или как вторая ступень защиты при ударе молнии. Устанавливаются в распределительные щиты. Нормируются импульсом с формой волны 8/20 мкс.
III(D)	Предназначены для защиты потребителей от остаточных бросков напряжений, защиты от дифференциальных (несимметричных) перенапряжений (например, между фазой и нулевым рабочим проводником в системе TN-S), фильтрации высокочастотных помех. Устанавливаются непосредственно возле потребителя. Могут иметь самую разнообразную конструкцию (в виде розеток, сетевых вилок, отдельных модулей для установки на DIN-рейку или навесным монтажом). Нормируются импульсным током с формой волны 8/20 мкс.

### 1.15.3.3 Требования ГОСТ к устройствам защиты от импульсных перенапряжений

Согласно определению, приведенному в ГОСТ Р 51992-2002 (МЭК 61643-1-98): "Устройство защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) – это устройство, которое предназначено для ограничения переходных перенапряжений и для отвода импульсов тока. Это устройство содержит, по крайней мере, один нелинейный элемент". В качестве элементной базы для создания УЗИП используют разрядники различных типов и оксидно-цинковые варисторы.

Устройства защиты от импульсных перенапряжений на базе варисторов обеспечивают качественную защиту при их применении в 1-й ступени при амплитудах  $I_{imp}=20$  кА (10/350 мкс), что в большинстве случаев достаточно даже для воздушного ввода питающей линии в объект. Для защитных устройств, устойчивых к более высоким амплитудам грозových токов, рекомендуется применять разрядники искрового типа, которые могут иметь

значение  $I_{imp}=50-100$  кА (10/350 мкс).

Существующая взаимосвязь между зонами молниезащиты, классами защиты устройств и категориями стойкости изоляции оборудования к импульсным перенапряжениям (таблица 1.35) показана на рисунок 1.101.

Таблица 1.35 – Номинальное импульсное выдерживаемое напряжение электрооборудования (ГОСТ Р 50571.19-2000 (МЭК 60364-4-443-95))

Номинальное напряжение		Импульсное испытательное напряжение, кВ			
Трёхфазные системы	Однофазные системы со средней точкой	Оборудование, установленное до распределительного щита, категория IV	Оборудование установленное внутри зданий		
			категория III	категория II	категория I
–	120–240	4,0	2,5	1,5	0,8
230/400–277/480	–	6,0	4,0	2,5	1,5
400/690	–	8,0	6,0	4,0	2,5
1000	–	Значения напряжений выбирают инженеры-системотехники			

УЗИП класса I устанавливаются на вводе в здание (во вводном щите, ГРЩ или в специальном боксе) после вводного автомата (на границе зоны 0 и зоны 1). УЗИП класса II располагают во вторичных распределительных щитах (например, в щитах выпрямителей, этажных и других щитах). Желательно устанавливать их до групповых автоматов. Устройства этого класса могут быть размещены на границе зон 1 и 2, возможно их размещение в зоне 1 вместе с устройствами класса I. УЗИП класса III могут устанавливаться в распределительных щитах или непосредственно у потребителя (защитная зона 3). Если от места установки УЗИП до потребителя расстояние более 10–15 м, желательно установить дополнительное устройство III класса в непосредственной близости от защищаемого оборудования, чтобы гарантировано устранить возможные наводки на указанных длинах кабеля.

Одним из основных параметров УЗИП является уровень защиты ( $U_p$ ) – максимальное значение падения напряжения на защитном устройстве при протекании через него импульсного тока разряда. Параметр характеризует способность устройства ограничивать появляющиеся на его клеммах перенапряжения и обычно определяется при протекании номинального импульсного разрядного тока. Из рисунка 1.101 видно, что каждая ступень защиты обеспечивает выполнение требований по импульсной стойкости

изоляции. Как правило, УЗИП класса I на базе разрядника имеют  $U_p=4$  кВ (с применением варистора – ниже), УЗИП класса II – 1,3–2,5 кВ, а класса III – 0,8–1,5 кВ.

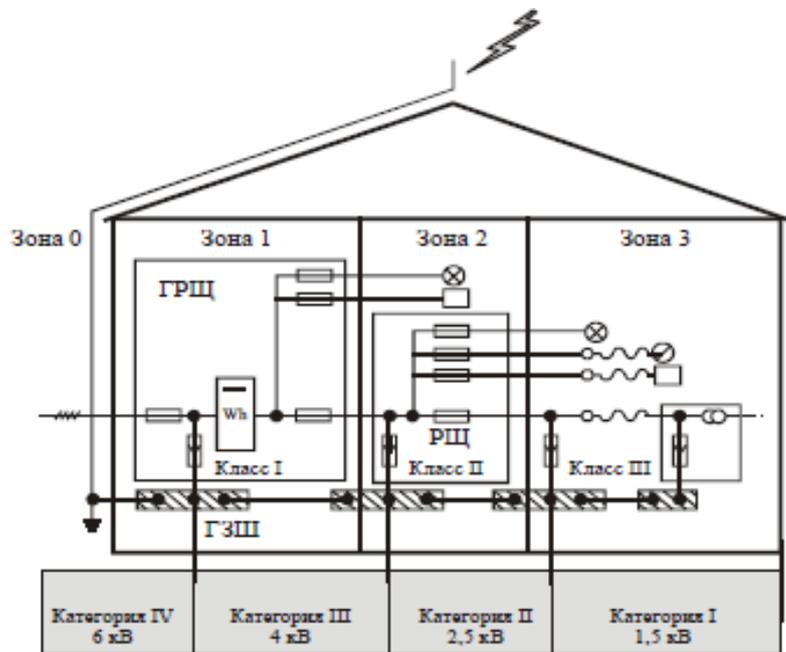


Рисунок 1.101 – Взаимосвязь между зонами молниезащиты, классами защитных устройств и категориями стойкости изоляции оборудования и импульсным перенапряжением

#### 1.15.3.4 Схемы включения устройств защиты от импульсных перенапряжений

Основные принципы применения УЗИП в отечественной нормативной базе рассмотрены в ГОСТ Р 50571.26-2002 (МЭК 60364-5-534-97) "Электроустановки зданий. Часть 5. Выбор и монтаж электрооборудования. Раздел 534. Устройства для защиты от импульсных перенапряжений". Это первый стандарт МЭК по применению УЗИП, изданный в системе ГОСТ Р. Более подробно проблема защиты от импульсных перенапряжений рассматривается в других стандартах МЭК, некоторые из них готовятся к изданию в системе ГОСТ Р. Предлагаемые ниже решения основаны на требованиях именно этих стандартов.

Существует две основные схемы включения УЗИП в питающую линию (рисунок 1.102): схема предназначена для защиты от симметричных (продольных) перенапряжений (провод–земля), и схема – от несимметричных

(поперечных) перенапряжений (провод–провод).

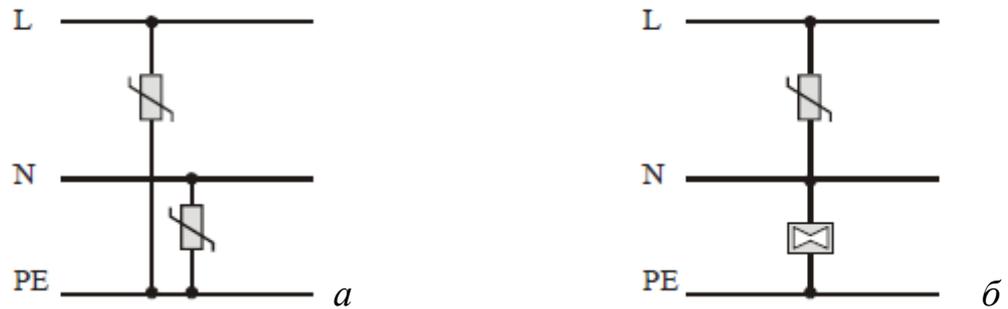


Рисунок 1.102 – Схемы защиты от перенапряжений: симметричных (*a*) и несимметричных (*б*)

Результаты экспериментов показали, что более высокую опасность имеют несимметричные перенапряжения (на клеммах электроприемников L/N) по сравнению с симметричными (на клеммах электроприемников L/PE и N/PE). При проектировании различных ступеней защиты возможно комбинирование этих схем.

Схема подключения УЗИП для наиболее часто применяемых сетей типа TN–C–S приведена на рисунке 1.103*a*. Ограничители классов I и II включаются между токоведущими проводниками (L1, L2, L3, N) и нулевым защитным проводником (PE) для ограничения симметричных перенапряжений (провод–земля). УЗИП класса III могут включаться или по той же схеме, что и УЗИП классов I и II, или по схеме, обведенной пунктирной линией, для ограничения несимметричных перенапряжений (провод–провод). Возможно также применение УЗИП в соответствии со схемой на рисунке 1.103*б*.

### 1.15.3.5 Очередность срабатывания устройств защиты от импульсных перенапряжений

При установке защитных устройств необходимо, чтобы расстояние между соседними ступенями защиты было не менее 10 м по кабелю электропитания (рисунок 1.104). Выполнение этого требования необходимо для правильной очередности срабатывания защитных устройств. В момент возникновения в силовом кабеле импульсного грозового перенапряжения с очень крутым фронтом, за счет увеличения индуктивного сопротивления жил кабеля при

протекании по ним импульса тока, на них возникает падение напряжения, которое оказывается приложенным к первому каскаду защиты. Таким образом, достигается его первоочередное срабатывание (обеспечивается необходимая временная задержка в нарастании импульса перенапряжения на следующей ступени защиты). Такие же требования предъявляются при подключении третьей ступени защиты.

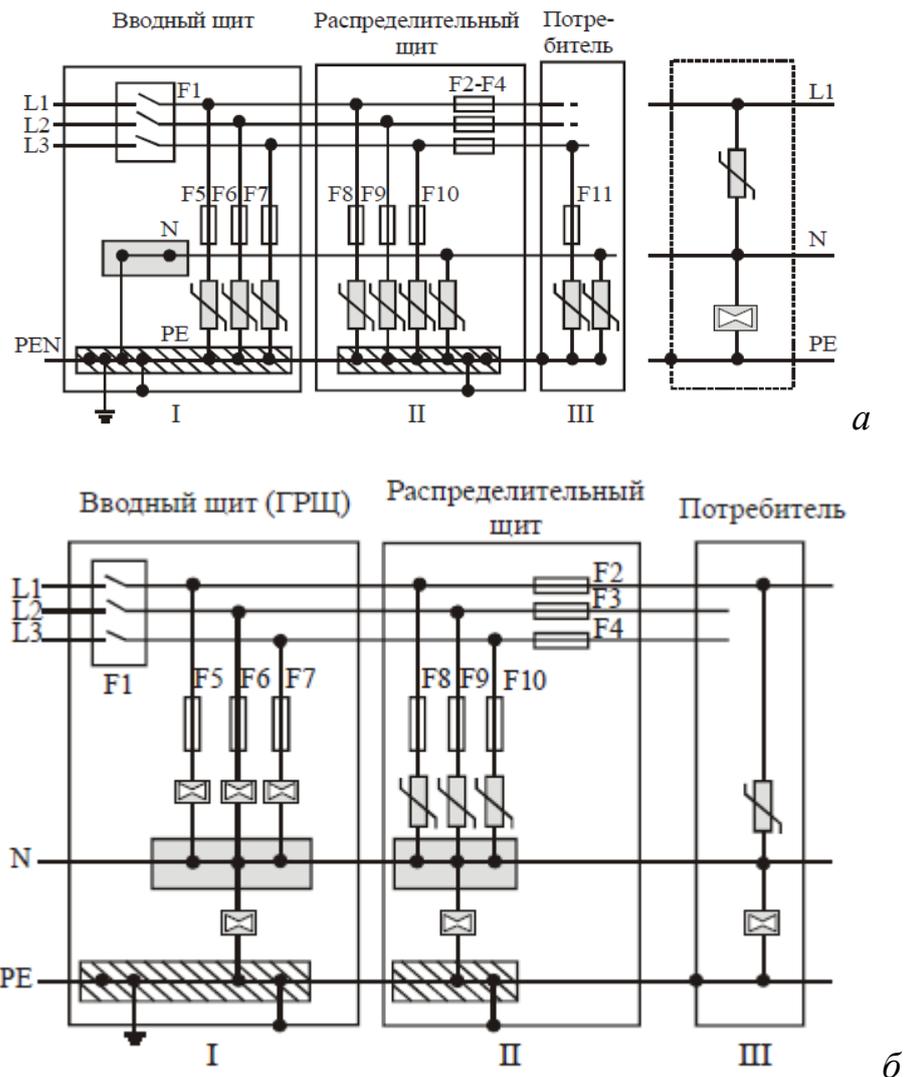


Рисунок 1.103 – Варианты установки УЗИП в сети: TN-C-S 220/380 В (а) и TN-S (б)

Размещая УЗИП на расстоянии ближе 10 м или рядом, необходимо использовать искусственную линию задержки в виде импульсного разделительного дросселя с индуктивностью не менее 6–15 мкГн. Выбор величины индуктивности зависит от способа ввода питания в объект. При

подземном вводе, когда в первом каскаде защиты установлены варисторы, величина индуктивности может быть порядка 6 мкГн. При воздушном вводе (в первой ступени установлены разрядники) это значение должно быть не менее 12–15 мкГн. Это объясняется разным временем срабатывания разрядников и варисторов. При установке дросселей необходимо учитывать, что рабочие токи нагрузки в фазных проводниках не должны превышать указанные в их техническом паспорте предельно допустимые значения.

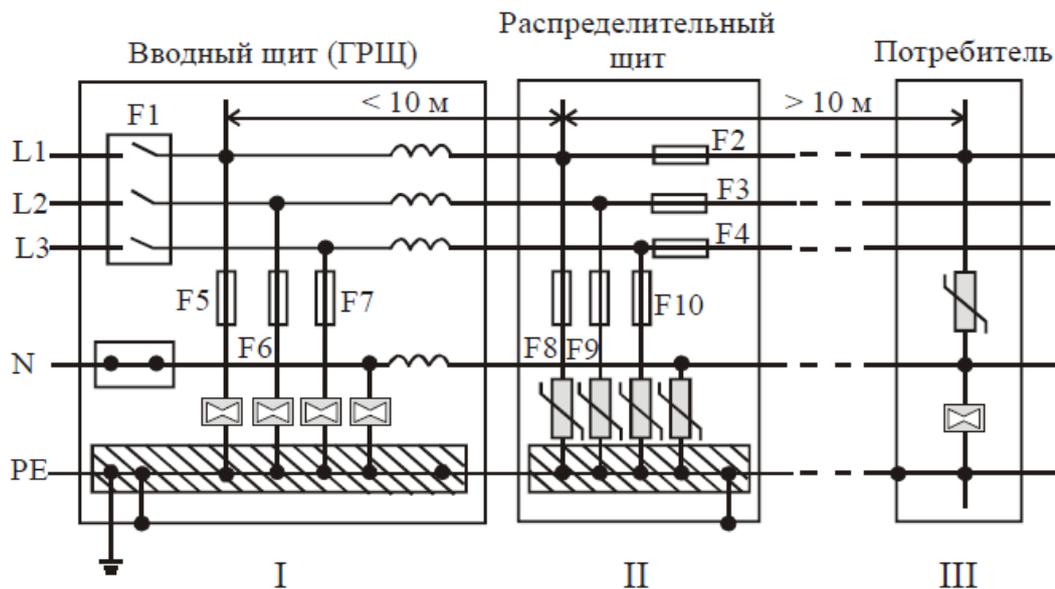


Рисунок 1.104 – Вариант установки защитных устройств в TN-S сеть 220/380 В с использованием дросселей

### 1.15.3.6 Монтаж устройств защиты от импульсных перенапряжений

Устройства защиты могут размещаться в отдельном щитке, допускается в одном щитке устанавливать ограничители перенапряжений всех трех классов. Это становится возможным при установке между ними разделительных дросселей. Пример схемы подключения к электроустановке защитного щитка с двумя ступенями защиты приведен на рисунке 1.105.

К нагрузочной стороне вводного автомата подключается вход щитка, к силовой стороне групповых автоматов – выход щитка. Заземление щитка должно осуществляться на главную заземляющую шину (ГЗШ) объекта или РЕ шину вводного щита (ГРЩ). Основные требования по монтажу и подключению ГЗШ изложены далее. При монтаже УЗИП необходимо обеспечить

минимальное расстояние между главной заземляющей шиной объекта, защитным щитком и вводным щитком. Проводники РЕ должны по возможности прокладываться кратчайшим путем без образования петель и острых углов.

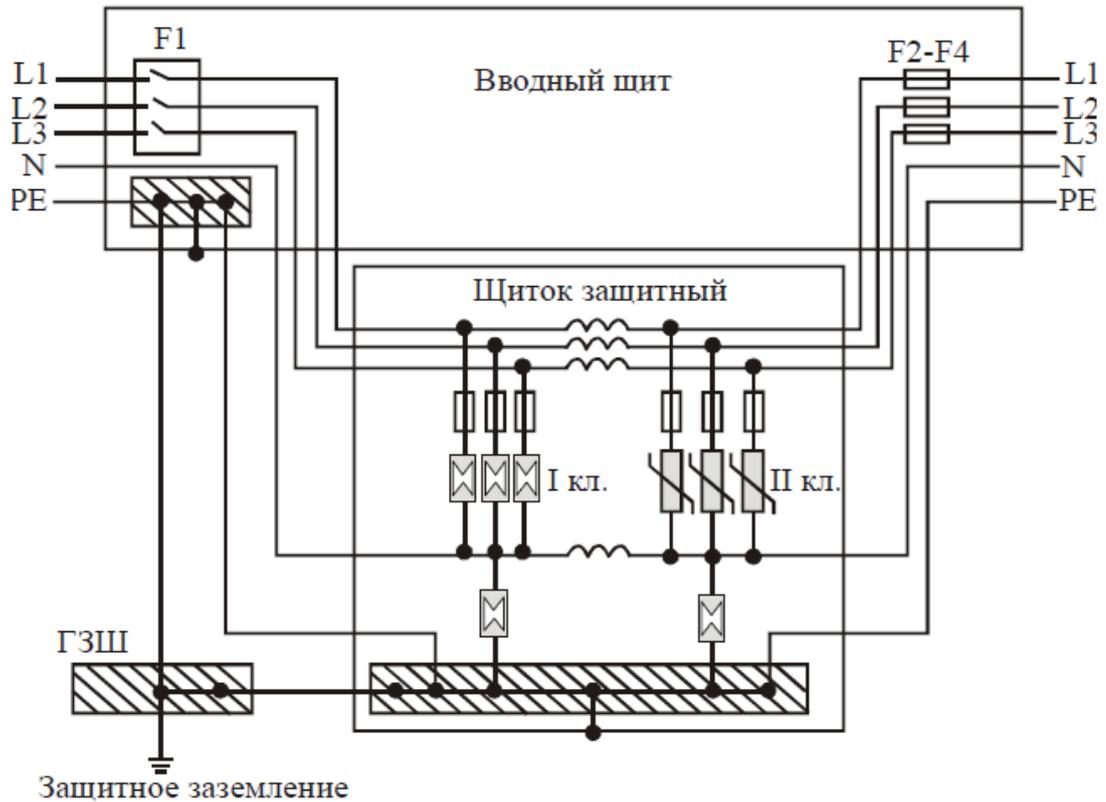


Рисунок 1.105 – Установка защитного щитка в трехфазную TN–S сеть

При подключении силовых кабелей к щитку необходимо избегать совместной прокладки защищенного и незащищенного участков кабеля, а также защищенного кабеля и кабеля заземления (рисунок 1.106).

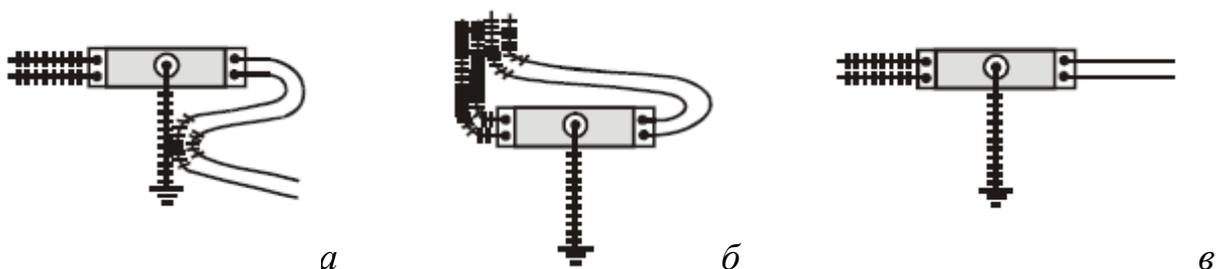


Рисунок 1.106 – Установка защитного щитка в трехфазную TN–S сеть

#### 1.15.4 Дополнительная защита от токов короткого замыкания

Основным принципом схем включений защитных устройств является

уравнивание потенциалов между двумя проводниками, одним из которых является фазный проводник, а другим – нулевой рабочий или нулевой защитный. Между ними в случае выхода из строя УЗИП возможно возникновение короткого замыкания. Тепловая защита варисторных ограничителей (устройство отключения при перегреве варистора) срабатывает, как правило, при старении варистора, когда увеличиваются токи утечки, или при превышении фактического тока разряда через ограничитель над максимально допустимым. В последнем случае воздействие кратковременное, варистор из строя может не выйти, но будет отключен от защищаемой цепи в результате выделения большого количества тепловой энергии.

Иная ситуация возникает в случае установившегося превышения действующего напряжения в сети над максимальным допустимым для данного УЗИП рабочим напряжением. Пример такой ситуации: отгорание нулевого рабочего проводника при вводе в электроустановку, когда к нагрузке может оказаться приложенным межфазное напряжение 380 В. При этом варистор открывается и через него длительное время протекает ток, близкий по величине к току КЗ.

Из практики известно, что в подобных ситуациях устройство тепловой защиты не всегда срабатывает, а в составе УЗИП на базе разрядников такого устройства вообще нет. Поэтому для защиты от КЗ электроустановки и УЗИП всех типов необходима дополнительная защита в виде предохранителей F5-F10 с характеристикой срабатывания gG (классификация согласно ГОСТ Р 50339.0-92 (МЭК 60269-1-86)), устанавливаемых в цепь последовательно с каждым УЗИП (рисунки 1.104 и 1.105). Эти предохранители предназначены для защиты токоведущих проводников и коммутационных устройств от перегрузок и КЗ и имеют довольно сложную внутреннюю конструкцию.

Применение вместо предохранителей автоматических выключателей не гарантирует необходимый результат. Опыт эксплуатации показывает, что при грозном разряде автоматы могут повреждаться импульсом тока. Из-за приваривания контактов расцепителя появляется вероятность его

несрабатывания при КЗ в нагрузке. Предохранитель исключает такую ситуацию. Кроме этого, правильный выбор номинала предохранителя снижает вероятность его перегорания при прохождении через защитное устройство импульсного тока при ударе молнии.

При отказе от установки предохранителей в случае возникновения КЗ хотя бы в одном из ограничителей перенапряжения, срабатывает вводный автомат и электропитание потребителя будет прервано до устранения неисправности. Применение предохранителей в цепи каждого ограничителя перенапряжений уменьшает вероятность такой ситуации. При выборе номиналов предохранителей следует руководствоваться рекомендациями производителя УЗИП. Номиналы общих и индивидуальных предохранителей определяются с учетом селективности их срабатывания и способности защитных устройств выдерживать расчетные токи КЗ для конкретной установки. Вопросы, связанные с методикой выбора номиналов предохранителей и возможностью применения автоматических выключателей, в настоящее время подробно изучается.

#### **1.15.4.1 Методика выбора типа защитных устройств**

Система внутренней молниезащиты для питающей сети до 1000 В, состоящая из УЗИП разного типа, должна отводить грозовые токи (или их большую часть) без повреждения самих защитных устройств. Для определения величины тока, проходящего через УЗИП первой ступени защиты в случае прямого удара молнии в здание с системой внешней молниезащиты, рекомендуется исходить из конфигурации системы заземления и уравнивания потенциалов здания, а также подведенных к нему коммуникаций. На рисунке 1.107 приведен классический пример распределения грозового тока в объекте, пораженном прямым ударом молнии (МЭК 61024-1-1, МЭК 61643-12).

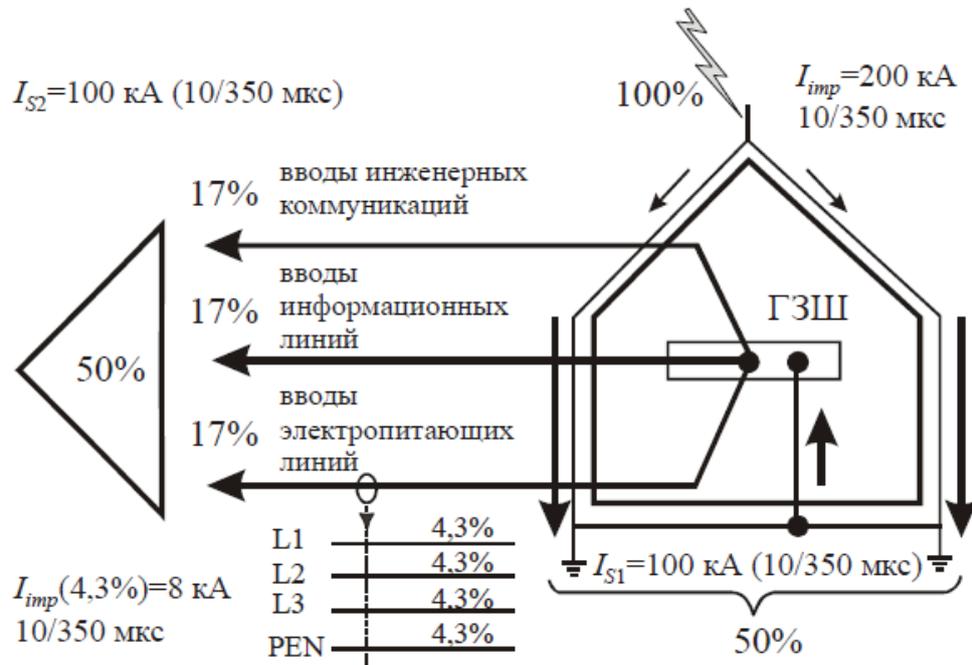


Рисунок 1.107 – Распределение токов молнии при прямом ударе в объект связи

Методика расчета токов растекания приведена в ГОСТ Р 51992-2002 (МЭК 61643-1-98), приложение А.

Чтобы установить, как распределены токи между металлическими элементами конструкции здания при попадании молнии в систему внешней молниезащиты, необходимо рассчитать сопротивления заземляющих устройств, трубопроводов, электропитающего ввода, ввода кабелей связи и т.п. Если точный расчет затруднен оценка производится, исходя из следующих рассуждений:

- расчет производится для пикового значения тока  $I_{imp}$ , взятого из Инструкции СО-153-34.21.122-2003 в соответствии с выбранным уровнем защиты от ПУМ. Например, для объектов с первым уровнем защиты  $I_{imp}=200$  кА (10/350 мкс);
- 50% от общего тока ( $I_{imp}=200$  кА (10/350 мкс)  $\rightarrow$   $I_{S1}=100$  кА (10/350 мкс)) отводится в землю через заземляющее устройство системы внешней молниезащиты;
- 50% от общего тока ( $I_{imp}=200$  кА (10/350 мкс)  $\rightarrow$   $I_{S2}=100$  кА (10/350 мкс)) разделится равномерно (приблизительно по 17%) между

наружными вводами в объект трех основных видов коммуникаций: кабелями связи и передачи информации, металлическими трубопроводами и вводом электрического питания 220/380 В.

Величина тока, проходящего через отдельные вводы  $I_i$  определяется:

$$I_i = I_{S2} / n,$$

где  $n$  – число вводов.

Для оценки тока в отдельных жилах неэкранированного кабеля  $I_V$  ток в кабеле делится на количество проводников  $m$ :

$$I_V = I_i / m.$$

При выборе типа защитных устройств и их основных параметров целесообразно руководствоваться следующим алгоритмом:

- расчет производится исходя из максимального значения грозового тока  $I_{imp}$  (10/350 мкс) в зависимости от уровня защиты объекта от прямого удара молнии;
- далее для каждого проводника системы питания определяется (по приведенной выше методике) значение импульсного тока формы (10/350 мкс), который может в нем протекать и который должно гарантированно отвести защитное устройство класса I;
- после этого выбирается защитное устройство с некоторым запасом (20–30%), учитывая возможную неравномерность растекания токов по различным проводникам.

Изменение исходных данных (числа вводов в объект, типа системы электропитания, количества проводников в кабеле и т.д.) меняет итоговые значения как в сторону уменьшения импульсных токов, так и в сторону их увеличения. В экранированных кабелях большая часть токов растекается через экранные оболочки. Такие кабели рекомендуется применять на объектах с повышенными требованиями к защищенности от ударов молнии.

#### **1.15.4.2 Методика выбора УЗИП при воздушном вводе**

Оценочный расчет показывает, что при прямом попадании молнии с током

$I_{imp}=200$  кА (10/350 мкс) в объект с воздушным вводом питания и при условии его равномерного распределения по четырем проводам системы TN–С импульсные токи в каждом проводе будут составлять около 50 кА. Их стекание на землю будет осуществляться в две стороны: через оборудование низковольтной стороны подстанции и элементы электроустановки объекта в примерном соотношении 1:1. Таким образом, в каждом проводе на вводе питания ток будет равен 25 кА (10/350 мкс). В случае если равномерного растекания токов по какой-то причине не произошло, то это значение может возрасти до 45–50 кА и более.

Устройства защиты от импульсных перенапряжений на базе варисторов обеспечивают качественную защиту при их применении в первой ступени при амплитудах  $I_{imp}=20$  кА (10/350 мкс), что в большинстве случаев достаточно даже при воздушном вводе питающей линии в объект. Если защитное устройство должно выдерживать более высокие амплитуды грозовых токов, рекомендуется применять разрядники искрового типа с  $I_{imp}=50–100$  кА (10/350 мкс).

При выборе искрового разрядника необходимо обращать внимание на такой параметр, как сопровождающий ток  $I_f$ , который протекает через разрядник после окончания импульса перенапряжения и поддерживается источником питания. Фактически значение этого тока стремится к расчетному току КЗ в точке установки разрядника для данной конкретной электроустановки. Поэтому в цепи "L-N; L-PE" нельзя применять, например, газонаполненные (и другие) разрядники со значением  $I_f$  равным 100–300 А. В результате длительного воздействия сопровождающего тока они будут повреждены и могут вызвать пожар. Для установки в данную цепь необходимы разрядники со значением  $I_f$ , превышающим ток КЗ, т.е. от 2–3 кА и выше.

#### **1.15.4.3 Обобщенные рекомендации по выбору защитных устройств**

В качестве первой ступени защиты рекомендуется:

- При воздушном вводе электропитания (вне зависимости от наличия внешней системы молниезащиты, когда возможно прямое попадание молнии в провода ЛЭП в непосредственной близости от объекта) рекомендуется устанавливать грозовые разрядники. Они должны пропускать импульсные токи формы 10/350 мкс с амплитудным значением 50–100 кА, гасить сопровождающие токи величиной более 4 кА и обеспечивать уровень защиты ( $U_p$ ) менее 4 кВ (например, многоазорные угольные искровые разрядники без выброса ионизированных газов).
- При подземном вводе электропитания (при наличии внешней системы молниезащиты, когда существует вероятность попадания молнии в молниеприемник) можно устанавливать варисторные защитные устройства, способные пропускать импульсные токи формы 10/350 мкс с амплитудным значением 10–25 кА и обеспечивать уровень защиты  $U_p=4$  кВ и ниже. При этом желательно произвести предварительную оценку токов растекания по приведенной выше методике.
- При отсутствии внешней системы молниезащиты ее необходимо установить, так как прямой удар молнии при отсутствии внешней защиты приводит к динамическим воздействиям на строительные конструкции объекта, а также может вызвать пожар за счет искрения и перекрытия воздушных промежутков между токопроводящими элементами объекта.

В качестве второй ступени защиты в цепях L–N используются устройства на базе варисторов с максимальным импульсным током 20–40 кА формы 8/20 мкс и уровнем защиты ( $U_p$ ) менее 2,5 кВ. В цепях N–PE применяются газонаполненные металлокерамические разрядники, способные выдерживать импульсные токи с амплитудой 20–40 кА формы 8/20 мкс. Сопровождающие токи в цепях N–PE не возникают, поэтому могут применяться разрядники с  $I_f = 100–300$  А.

В качестве третьей ступени защиты используются модули с максимальным импульсным током 6–10 кА формы 8/20 мкс и уровнем защиты ( $U_p$ ) менее 1,5 кВ. Целесообразно применять комбинированные устройства с дополнительным помехоподавляющим фильтром в полосе частот 0,15–30 МГц.

Разделительные дроссели (если их применение необходимо) выбираются, исходя из величины максимальных рабочих токов нагрузки (например: 16, 32, 63 или 120 А).

Для объектов с подземным вводом питания можно применять комбинированные устройства, отвечающие по своим входным параметрам требованиям к варисторным защитным устройствам I класса (импульс тока величиной 10–25 кА; форма 10/350 мкс). По своим выходным параметрам (уровень защиты  $U_p = 1300–1700$  В при номинальном импульсном токе, форма 8/20 мкс) они выполняют требования по II классу защиты.

Подобные устройства позволяют отказаться от использования разделительных дросселей, т.к. все устройство смонтировано в одном общем корпусе для установки на DIN-рейку. Размер корпуса при этом меняется в зависимости от количества защищаемых проводников и соответствует размеру от двух до семи стандартных типовых корпусов (для однофазной и трехфазной сети соответственно).

В случае установки комбинированного устройства на воздушном вводе электропитания существует вероятность его выхода из строя при ударе молнии непосредственно в провода ЛЭП у объекта.

#### **1.15.4.4 Особенности подключения УЗИП**

В некоторых ситуациях установки защиты на вводе в здание недостаточно для того, чтобы с большой степенью вероятности защитить такую категорию потребителей, как высокочувствительная электронная техника. В этом случае защитные устройства третьего класса устанавливаются непосредственно у защищаемого оборудования.

При использовании устройств защиты от импульсных перенапряжений

необходимо учитывать некоторые особенности их подключения в схему электроустановки объекта.

В случае применения устройств защитного отключения (УЗО) устройства защиты от импульсных перенапряжений первого и второго класса должны быть включены до УЗО (по ходу энергии). Этим исключается ложное отключение УЗО при срабатывании УЗИП.

Устройства защиты третьего класса могут быть установлены после УЗО, но при этом должны использоваться селективные устройства защитного отключения (тип "S") с временной задержкой срабатывания от импульсных помех (рисунок 1.108).

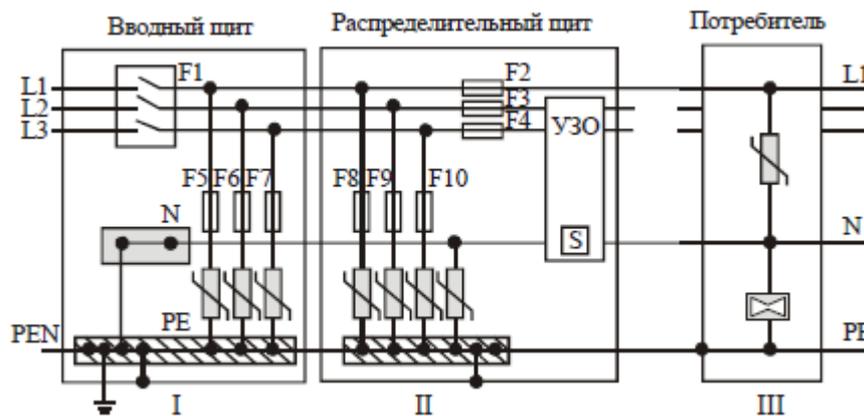


Рисунок 1.108 – Установка защитных устройств в TN-C-S сети 220/380 В

При измерениях, производимых на электроустановке, когда методикой измерений предусматриваются испытания высоким напряжением (например, проверка сопротивления изоляции проводников), необходимо отключать защитные устройства от электроустановки. Несоблюдение этого требования приведет к искажению результатов измерения или к выходу из строя устройств защиты от импульсных перенапряжений.

## 2 Самостоятельная работа

В процессе подготовки к практическим занятиям, студентам необходимо обратить особое внимание на проработку лекционного материала и самостоятельное изучение рекомендованной учебно-методической, а также научной и популярной литературы. Самостоятельная работа с учебниками, учебными пособиями, научной, справочной и популярной литературой, материалами периодических изданий и Интернета, статистическими данными является наиболее эффективным методом получения знаний, позволяет значительно активизировать процесс овладения информацией, способствует более глубокому усвоению изучаемого материала, формирует у студентов свое отношение к конкретной проблеме. Более глубокому раскрытию вопросов способствует знакомство с дополнительной литературой, рекомендованной преподавателем по каждой теме семинарского или практического занятия, что позволяет студентам проявить свою индивидуальность в рамках выступления на данных занятиях, выявить широкий спектр мнений по изучаемой проблеме.

Для получения больших навыков работы с программными средствами рекомендуется рассмотрение тестовых примеров и их усовершенствование, изучение новых функций и прочих особенностей их использования. Помимо этого требуется выполнение нескольких заданий, по результатам которых должны быть подготовлены соответствующие отчеты.

Отдельного внимания заслуживает изучение нормативной документации по ЭМС. При её изучении рекомендуется составлять конспекты, которые позволят систематизировать знания по обеспечению ЭМС в электроэнергетике.

**Список использованной литературы**

1. Куксенко С.П. Актуальность подготовки специалистов по электромагнитной совместимости в топливно-энергетическом комплексе Сибири /С.П. Куксенко // 22-я Межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-22-2016)». – Томск. – 2016.
2. Электробезопасность. Теория и практика: учебное пособие для вузов / П.А. Долин, В.Т. Медведев, В.В. Корочков, А.Ф. Монахов; под ред. В.Т. Медведева. – 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ, – 2012.
3. СТО 56947007-33.060.40.134-2012. Типовые технические решения по системам ВЧ связи. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», 2012.
4. Patsiuk V. Calculation of the magnetic fields of the electric power line / V. Patsiuk, V. Berzan, G. Rybacova // Problemele energeticii regionale 3 (32) 2016, Electroenergetica. – P. 1–12.
5. Кабышев А.В. Молниезащита электроустановок систем электроснабжения: учебное пособие /А.В. Кабышев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 124 с.
6. Барышев Е.Е. Расчет молниезащитных зон зданий и сооружений: учебное пособие /Е.Е. Барышев, В.С. Мушников, И.Н. Фетисов. – ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2009.
7. Бессонов В.А. Электромагнитная совместимость: Учебное пособие / В.А. Бессонов – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2000.
8. Карякин Р. Заземляющие устройства электроустановок: справочник / Р. Карякин – 2-е изд. – Москва : Энергосервис, 2006.
9. ELCUT для обучения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://elcut.ru/vuz\\_r.htm](https://elcut.ru/vuz_r.htm). Дата обращения: 18.06.2018.