

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Электрические станции»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ОРУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Методические указания
по курсовому и дипломному проектированию
для студентов энергетических специальностей

Минск
БНТУ
2012

УДК 621.316.99:378.147.091.313(075.8)

ББК 31.277.1я7

П79

Составитель *В. Н. Мазуркевич*

Рецензенты:

В. Н. Сацкевич, М. И. Фурсанов

Издание содержит основные сведения о назначении заземляющих устройств электрических станций и подстанций, их нормируемых параметрах, параметрах земли и их сезонных изменениях на территории Республики Беларусь, конструктивном исполнении заземляющих устройств, рекомендации по выполнению заземления различных видов электрооборудования. Приведены методики расчета заземляющих устройств в электроустановках с различным способом заземления нейтрали. Дан пример проектирования заземляющего устройства двух трансформаторной подстанции 110/10 кВ.

© Белорусский национальный
технический университет, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

1. НАЗНАЧЕНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК И ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ	5
2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛИ	8
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОГО ТОКА СТЕКАЮЩЕГО С ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ	11
3.1. Расчетный ток для ЗУ в эффективно-заземленных сетях..	11
3.2. Расчетный ток для ЗУ в сетях выше 1 кВ с незаземленной нейтралью и заземленной через дугогасящие реакторы.....	12
4. НОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ТРЕБОВАНИЯ К ИХ КОНСТРУКТИВНОМУ ИСПОЛНЕНИЮ	13
4.1. Требования к ЗУ ЭУ с эффективно-заземленной нейтралью, выполняемого по норме на допустимое сопротивление.....	13
4.2. Требования к ЗУ установок с эффективно-заземленной нейтралью, выполняемым по норме на допустимое напряжение прикосновения.....	18
4.3 Требования к ЗУ электроустановок напряжением выше 1 кВ с незаземленной нейтралью или заземленной через дугогасящие реакторы.....	19
4.4. Конструктивное исполнение заземляющих устройств в закрытых РУ, зданиях пунктов управления и релейных щитов.....	20
4.5. Выбор сечений элементов заземляющих устройств.....	23
4.6. Определение сопротивления естественных заземлителей, имеющихся на территории ЭУ, где сооружается ЗУ.....	26
4.7 Конструктивное исполнение заземления молниеотводов ОРУ..	28
5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 кВ	32
5.1. Последовательность проектирования ЗУ.....	32
5.2. Расчет электрических параметров ЗУ в электроустановках выше 1 кВ с незаземленной нейтралью или заземленной через дугогасящие реакторы.....	34

5.3. Расчет электрических параметров ЗУ в установках с эффективно-заземленной нейтралью, выполняемое по норме на допустимое сопротивление.....	38
5.4. Расчет электрических параметров ЗУ в электроустановках с эффективно-заземленной нейтралью, выполняемого по норме на допустимое напряжение прикосновения.....	40
6. ПРИМЕР ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗУ ДЛЯ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ 110/10 кВ.....	44
ЛИТЕРАТУРА.....	53
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	54

1. НАЗНАЧЕНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК И ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

При повреждении фазной изоляции проводников электрических установок (однофазные замыкания) в месте повреждения возникает ток, значение и продолжительность протекания которого зависят от способа заземления нейтрали электрической сети. В сетях с незаземленной нейтралью или заземленной через дугогасящие реакторы ток однофазного замыкания обычно не превышает нескольких десятков или сотен ампер, а продолжительность его протекания может составлять несколько часов. В эффективно-заземленных сетях ток заземления достигает тысяч ампер, но продолжительность его протекания не превышает десятых долей секунды, поскольку поврежденный участок сети отключается автоматически релейной защитой.

От места повреждения ток замыкания I_3 возвращается к источнику энергии частично по проводникам – частично через землю. Поскольку удельное сопротивление земли существенно превышает удельное сопротивление проводниковых материалов, то в месте перехода тока в землю возникают значительные напряжения. Эти напряжения опасны для обслуживающего персонала и для их снижения в электроустановках сооружается заземляющее устройство (ЗУ), к которому присоединяются все металлические части установки нормально не находящиеся под напряжением, но которые могут оказаться под напряжением из-за повреждения изоляции.

Основой заземляющего устройства (ЗУ) является заземлитель, представляющий собой систему неизолированных проводников, находящихся в контакте с землей и предназначенных для проведения тока в землю. Конструктивно заземлитель открытых распределительных устройств (ОРУ) электростанций и подстанций выполняется в виде замкнутой сетки из стальных прутков или шин. Заземляющую сетку сооружают на территории расположения оборудования в земле на глубине 0,5–0,7 м и она состоит из продольных и поперечных горизонтальных заземлителей, дополняемых по внешнему контуру вертикальными заземлителями (электродами). К

заземляющей сетке присоединяют заземляемое оборудование с помощью коротких заземляющих проводников – спусков и все так называемые естественные заземлители, имеющиеся на территории электроустановки: металлические оболочки и броня кабелей, водопроводные трубы, проложенные в земле, заземленные грозозащитные тросы, металлоконструкции фундаментов и др.

При пробое изоляции заземленного электрического аппарата его корпус и заземлитель окажутся под напряжением U_3 :

$$U_3 = I_3 \cdot R_3, \quad (1.1)$$

где I_3 – ток замыкания, стекающий в землю с заземляющего устройства, А;

R_3 – сопротивление заземления (сопротивление стеканию тока с заземлителя), Ом.

Растекание тока с электродов заземлителя приводит к постепенному уменьшению потенциала почвы с удалением от электродов. В результате человек, прикоснувшись рукой к корпусу оборудования с поврежденной изоляцией, оказывается под напряжением, которое определяется как разница между потенциалом на корпусе и потенциалом на поверхности земли или пола, где он стоит. Это напряжение, называемое напряжением прикосновения U_{np} , составляет долю от напряжения на корпусе:

$$U_{np} = \alpha_{np} \cdot U_3, \quad (1.2)$$

где α_{np} – коэффициент напряжения прикосновения зависящий от условий растекания тока с заземлителя и ступней человека.

Таким образом, изменяя условия растекания тока с заземлителя и человека, сопротивление заземляющего устройства можно снизить напряжение прикосновения до допустимых пределов. Значение допустимых пределов напряжения прикосновения или противления ЗУ в электроустановках (ЭУ) с разным способом заземления

нейтрали и особенности конструкции ЗУ нормируются Правилами устройства электроустановок (ПЭУ).

Заземление, обеспечивающее безопасность персонала, называется защитным и оно обязательно для всех ЭУ при напряжениях 380 В и выше переменного тока, 440 В и выше постоянного тока, а в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных установках – при напряжении 42 В и выше переменного тока, 110 В и выше постоянного тока [1].

Кроме защитного в ЭУ различают рабочее и грозозащитное заземления. Рабочее заземление предназначено для создания нормальных условий работы электрических аппаратов или ЭУ. Без него аппарат не может выполнить своих функций или нарушается режим работы электроустановки.

Заземление, к которому присоединяются аппараты защиты оборудования от повреждения ударом молнии – разрядники, ограничители перенапряжений, искровые промежутки, стержневые и тросовые молниеотводы, называется грозозащитным. Обычно в ЭУ для выполнения всех трех типов заземлений используют одно заземляющее устройство.

Электрические параметры ЗУ (R_3 , U_3 , U_{np}) во многом зависят от величины удельного сопротивления земли. Земля неоднородна по механическому составу, содержанию влаги, солей, температуры. Верхний слой земли толщиной около 2 м в течение года изменяется в широких пределах: мороз и засуха увеличивают удельное сопротивление, дожди уменьшают его. Этот слой земли называют слоем сезонных изменений.

Поэтому при проектировании ЗУ конкретной ЭУ удельное сопротивление земли на ее территории определяют экспериментально.

Под проектированием ЗУ понимают процесс составления его описания, необходимого для создания ЗУ в конкретных условиях и обеспечивающих соответствие всех электрических характеристик ЗУ и требований к конструктивному исполнению действующим нормам при оптимальных затратах на сооружение и эксплуатацию на протяжении всего срока службы (25 лет).

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛИ

Под термином земля понимают верхний слой земной коры, по которому протекает ток однофазного замыкания. Проводимость земли обусловлена наличием влаги между частицами и растворенных в ней солей.

Удельное электрическое сопротивление земли (ρ_z) зависит от многих факторов, в том числе и от количества и толщины слоев, по которым протекает ток. В общем случае земля имеет многослойное строение и ее удельное сопротивление изменяется при перемещении по горизонтали и в глубину.

В табл. 2.1 приведены приближенные значения удельного сопротивления однородного грунта при нормальных условиях ($t=15^{\circ}\text{C}$, влажность 10–20 %) [3].

Таблица 2.1

Приближенные значения удельных сопротивлений грунта и воды

Вид грунта	ρ , Ом·м	
	Возможные пределы	Рекомендуемые для предварительных расчетов
Песок	400–1000 и более	700
Супесок	150–400 и более	300
Суглинок	40–150 и более	100
Глина	8–70 и более	40
Садовая земля	40	40
Чернозем	10–50 и более	20
Торф	20	20
Вода		
равнинных рек	10–80	50
Морская вода	0,2	0,2

Поверхностный слой земли, через который протекает ток от ног человека, прикоснувшегося к оборудованию с поврежденной изоля-

цией, имеет удельное сопротивление, отличающееся от сопротивления самого грунта. Для условий Республики Беларусь средние значения удельного сопротивления поверхностного слоя земли ($\rho_{пз}$) приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2.

Значения удельного сопротивления поверхностного слоя $\rho_{пз}$ для Республики Беларусь [2]

Грунт на территории электроустановки	$\rho_{пз}$, Ом·м
Травяной покров на глинистом грунте, глины, чернозем, супеси, суглинки	250
Бетон, песок, песчано-гравийная смесь	2000
Щебень, метлахская плитка	15000
Асфальт	100000

Основным способом определения удельного сопротивления земли на площадке размещения оборудования электроустановки является его измерение методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). ВЭЗ проводится по методике, изложенной в специальной литературе [3, 4]. Результаты ВЭЗ обрабатывают и по полученным данным определяют число слоев земли, их толщину и удельное сопротивление каждого из них.

Удельное сопротивление верхнего слоя земли (слоя сезонных изменений) h_s в течение года меняется в широких пределах. Для проектирования ЗУ необходимо знать максимальные и минимальные значения сопротивления этого слоя. Эти значения устанавливаются путем проведения ВЭЗ в разные сезоны года или с помощью поправочных коэффициентов, зависящих от влажности земли при проведении ВЭЗ. В табл. 2.3 приведены значения сезонных коэффициентов и толщины слоя сезонных изменений (h_c) земли для условий Республики Беларусь [2].

Максимальные значения сопротивления слоя сезонных изменений в Республике Беларусь бывает в конце зимы. Этот сезон года называется расчетным сезоном для расчета параметров ЗУ.

Методика расчета параметров ЗУ разработана применительно к однородной или двухслойной земле. Если по данным обработки

ВЭЗ установлено, что число слоев земли три и более, то полученные данные приводят к эквивалентной двухслойной. Параметры эквивалентной двухслойной земли устанавливаются такими, при которых заземлитель обладает одинаковой электрической характеристикой (R_{3y}), что и в многослойной земле. Методика приведения многослойной земли к эквивалентной двухслойной здесь не рассматривается. Предполагается, что в учебном проектировании ЗУ необходимые исходные данные задаются.

Таблица 2.3

Значение сезонных параметров земли для Республики Беларусь [2]

Коэффициент сезонных изменений, K_c				Глубина слоя сезонных изменений h_c , м
Усредненная величина	Влажность грунта перед проведением ВЭЗ			
		Повышенная	Средняя	Пониженная
3,4	5,0	3,0	2,0	1,8

При этом возможны три случая [4]:

– когда глубина слоя сезонных изменений h_c равна глубине верхнего слоя земли ($h_c = h_1$);

– когда h_c больше глубины верхнего слоя земли ($h_c > h_1$);

– когда h_c меньше глубины верхнего слоя земли ($h_c < h_1$).

В случае, когда $h_c = h_1$ приведенные расчетные значения параметров земли равны:

$$\rho_{1n} = K_c \cdot \rho_1; \quad \rho_{1n} = \rho_2; \quad h_{1n} = h_c, \quad (2.1)$$

где K_c – коэффициент сезонных изменений (см. табл. 2.3);

ρ_1, ρ_2 – заданные (измеренные) сопротивления слоев земли.

В случае, когда $h_c > h_1$ – приведенные расчетные сопротивления слоев земли:

$$\rho_{1n} = \frac{K_c \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot h_c}{\rho_2 h_c + \rho_1 h_c - h_1 \cdot h_c}; \quad \rho_{2n} = \rho_2; \quad \rho_{2n} = \rho_2; \quad (2.2)$$

Если $h_c < h_1$ – приведенные расчетные сопротивления слоев равны:

$$\rho_{1n} = \frac{K_c \cdot \rho_1 \cdot h_c}{K_c h_1 - K_c - 1 \cdot h_c}; \quad \rho_{2n} = \rho_2; \quad \rho_{2n} = \rho_2; \quad (2.3)$$

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОГО ТОКА СТЕКАЮЩЕГО С ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ

Для проектирования ЗУ необходимо определить наибольший ток стекающий с заземлителя в землю (I_3). Его величина зависит от рабочего заземления сети.

3.1. Расчетный ток для ЗУ в эффективно-заземленных сетях

При однофазном замыкании на землю в сети с эффективно заземленной нейтралью ток однофазного короткого замыкания ($I^{(1)}$) складывается из тока от электростанции, где будет сооружено ЗУ и тока от станций энергосистемы. От места повреждения ток $I^{(1)}$ возвращается к нейтралю трансформаторов по многим путям. Для расчета ЗУ необходимо определить наибольший ток, стекающий с заземлителя в землю.

Если повреждение происходит в пределах станции, то составляющая тока, посылаемая генераторами станции возвращается к нейтралю трансформаторов по проводникам ЗУ, не проникая в землю. Составляющая тока $I^{(1)}$ от станций системы возвращается к нейтралю их трансформаторов частично через землю, частично по грозозащитным заземленным тросам ЛЭП. В результате с проектируемого заземлителя в землю стекает только часть тока замыкания, посылаемого станциями системы.

При повреждении за пределами станции обе составляющие тока замыкания возвращаются к нейтралю трансформаторов частично по тросам, частично через землю. Через заземлитель станции в большинстве случаев проникающий при этом ток меньше чем при повреждении в пределах станции [2,5].

Конкретное значение расчетного тока I_{pz} можно определить по методике, изложенной в [2]. Ориентировочно это значение находится в пределах

$$I_{pz} \approx (0,3 \div 0,6) \cdot I^{(1)}. \quad (3.1)$$

3.2. Расчетный ток для ЗУ в сетях выше 1 кВ с незаземленной нейтралью и заземленной через дугогасящие реакторы

Согласно ПУЭ [1] в качестве расчетного тока для заземлителя принимается:

– в сетях с незаземленной нейтралью – полный ток замыкания на землю:

$$I_z = 3\omega \cdot C \cdot U_\phi; \quad (3.2)$$

– в сетях с дугогасящими реакторами для ЗУ, к которым присоединены дугогасящие реакторы – ток, равный 125 % номинального тока реактора; для ЗУ, к которым не присоединены дугогасящие реакторы – остаточный ток замыкания на землю при отключенном наиболее мощном реакторе.

здесь ω – частота переменного тока ($\omega = 2\pi \cdot f$);

C – емкость сети;

U_ϕ – действующее значение фазного напряжения.

4. НОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ТРЕБОВАНИЯ К ИХ КОНСТРУКТИВНОМУ ИСПОЛНЕНИЮ

Правилами устройства электроустановок регламентируется требования, которым должны удовлетворять параметры и конструкции заземляющих устройств электроустановок.

Для эффективно-заземленных сетей ($U_{ном} \geq 110$ кВ) ЗУ должны быть выполнены либо в соответствии с нормой на допустимое сопротивление, либо по норме на допустимое напряжение прикосновения. Независимо от нормы, по которой проектируется ЗУ, нормируется величина напряжения на заземлителе.

4.1. Требования к ЗУ ЭУ с эффективно-заземленной нейтралью, выполняемого по норме на допустимое сопротивление

ЗУ выполняемое по норме на допустимое сопротивление в любое время года должно иметь сопротивление заземлителя (R_3) не превышающее 0,5 Ом.

Выполнение ЗУ сопротивлением более 0,5 Ом допускается для земли с удельным сопротивлением более 500 Ом·м в соответствии с нормами, указанными в табл. 4.1 [2].

Таблица 4.1

Допустимые значения сопротивления ЗУ электроустановок напряжением 110–750 кВ

Допустимое значение сопротивления ЗУ, Ом	Удельное сопротивление земли, ρ_3 Ом·м
$R_{3у} \leq 0,5$	$\rho_3 \leq 500$
$R_{3у} \leq \frac{\rho_3}{1000}$	$500 \leq \rho_3 \leq 5000$
$R_{3у} \leq 5$	$\rho_3 \geq 5000$

Напряжение на ЗУ U_3 при стекании с него тока замыкания на землю для электроустановок напряжением 110–750 кВ не должно превышать величины указанных в табл. 4.2. [2].

Таблица 4.2

Допустимые значения напряжения на ЗУ
электроустановок напряжением 110–750 кВ

Характеристика электроустановки	Допустимое значение напряжения на ЗУ, $U_{3, доп}$
От ЭУ отходят линии связи и телемеханики, силовые кабели, трубопроводы, естественные заземлители и др., у которых не предусмотрены меры по защите от повреждения повышенным напряжением и меры по предотвращению выноса опасных потенциалов	до 5 кВ
От ЭУ отходят линии связи и телемеханики, силовые кабели, трубопроводы, естественные заземлители и др., у которых предусмотрены меры по защите от повреждения повышенным напряжением и меры по предотвращению выноса опасных потенциалов	до 10 кВ
От ЭУ не отходят коммуникации по которым может выноситься потенциал за пределы ЭУ	более 10 кВ

Конструктивно ЗУ должны быть выполнены следующим образом [1]: на территории, занятой требующим заземления оборудованием, зданиями и сооружениями ЭУ из стальных прутков или шин создается замкнутая заземляющая сетка. Заземляющая сетка образуется электрически соединенными между собой горизонтальными продольными и поперечными заземлителями (электродами). Продольные заземлители прокладывают вдоль рядов электрооборудования со стороны обслуживания на глубине 0,5–0,7 м от поверхности земли и на расстоянии 0,8–1,0 м от фундаментов и оснований оборудования. Поперечные заземлители прокладывают в удобных местах между оборудованием на той же глубине. Расстояние между соседними поперечными заземлителями должно увели-

чиваться от периферии к центру заземляющей сетки. При этом первое и последующие расстояния, начиная от периферии не должны превышать соответственно 4; 5; 6; 7,5; 9; 11; 13,5; 16; 20 м (рис. 4.1, а).

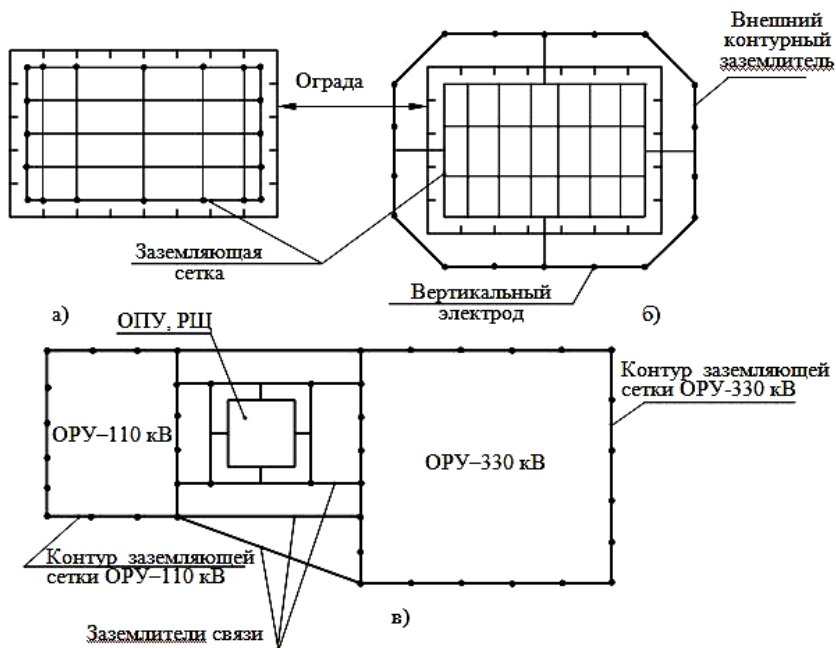


Рис. 4.1. Схемы ЗУ ОРУ

Крайние горизонтальные и поперечные заземлители прокладывают по контуру территории расположения оборудования в пределах ограды ЭУ и в совокупности должны образовывать замкнутый контур. При необходимости заземляющая сетка может дополняться отдельным контурным заземлителем (чаще всего на подстанциях 35, 110 кВ), расположенным внутри ограды ЭУ или за ее пределами. В пределах ограды контурный заземлитель прокладывается на глубине 0,5–0,7 м; при выходе за пределы ограды – на глубине не менее 1 м. При этом контурный заземлитель вне ограды выполняют в виде многоугольника без прямых углов (90°) и он должен соеди

няться с заземляющей сеткой не менее чем четырьмя соединителями в разных точках (рис. 4.1, б).

Кроме горизонтальных заземлителей ЗУ ЭУ оснащают вертикальными электродами. Вертикальные электроды устанавливают по периметру заземляющей сетки. Их длина ($l_в$) находится в пределах $5 \div 20$ м, а расстояние между ними (a) не должно быть меньше длины, обычно $a = 1 \div 3 l_в$.

В качестве вертикальных электродов в отдельных случаях при надлежащем обосновании могут использоваться глубинные заземлители, длина которых должна быть достаточной для достижения слоев земли с низким по отношению к верхним слоям удельным сопротивлением. Расстояние между глубинными вертикальными заземлителями должно быть не менее половины их длины, но не менее 10 м.

В местах присоединения нейтралей трансформаторов, шунтирующих реакторов к ЗУ требуется прокладывать продольные и поперечные горизонтальные электроды так, чтобы было обеспечено растекание тока не менее чем по четырем направлениям (рис. 4.2).

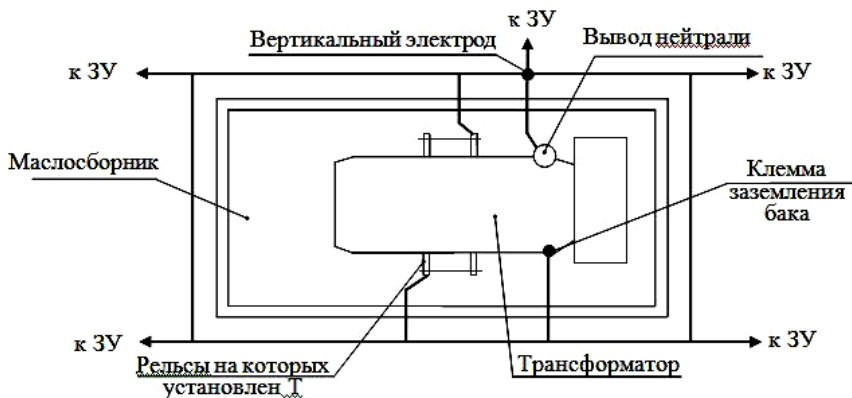


Рис. 4.2. Схема заземления трансформаторов (автотрансформаторов и шунтирующих реакторов)

Размеры ячеек заземляющей сетки, примыкающие к местам заземления нейтралей, не должны превышать 6×6 м. Вокруг маслоприемника трансформаторов (реакторов) прокладывают горизон-

тальный заземлитель, который в не менее чем в трех местах по его периметру присоединяют к ЗУ электроустановки.

В местах входов и въездов на территории ЭУ обязательна установка по одному вертикальному электроду длиной 3–5 м с обеих сторон дороги на внешнем периметре ЗУ.

Если ЭУ содержит несколько территориально раздельных ОРУ разных напряжений, то заземляющая сетка создается на каждом из них и между собой они соединяются горизонтальными заземлителями – связями. Число связей определяется при проектировании расчетом, но их должно быть не менее четырех [2].

Заземляющие связи прокладываются равномерно по длине соседних ОРУ, в том числе по краям. Если между ОРУ располагаются здания релейных щитов или пунктов управления, то две связи прокладываются вдоль их противоположных стен (рис. 4.1, в).

К заземляющей сетке в не менее чем в 2-х точках подключаются все естественные заземлители, имеющиеся на территории ЭУ – заземленные тросы воздушных линий; отходящие кабели, проложенные в земле и имеющие металлические покрытия; металлические трубопроводы воды, железнодорожные рельсы, металлические эстакады, арматура железобетонных фундаментов и др.

В соответствии с ПУЭ территория наружных ЭУ должна быть ограждена. Эту ограду обычно выполняют металлической и ее не рекомендуется присоединять к ЗУ. Расстояние от ограды до элементов ЗУ с внутренней и внешней стороны не должна быть меньше 2 м. Металлическая ограда должна быть заземлена. Для этого у стоек ограды по всему ее периметру устанавливаются вертикальные электроды длиной 2–3 м через 20–30 м.

Если отдельного заземления ограды выполнить невозможно, или внешний контур ЗУ выходит за пределы ограды, то металлические части ограды не менее чем в четырех местах по периметру соединяются с ЗУ. При этом у внешней стороны ограды на расстоянии 1 м от нее и на глубине 1 м прокладывают горизонтальный заземлитель, который по периметру ограды должен быть присоединен к ней не менее чем в четырех местах.

4.2. Требования к ЗУ установок с эффективно-заземленной нейтралью, выполняемым по норме на допустимое напряжение прикосновения

ЗУ, выполняемое с соблюдением требований к напряжению прикосновения (U_{np}), должно обеспечивать в любое время года при стекании с него тока замыкания на землю значений U_{np} не превышающих, указанных в табл. 4.3 [1].

Таблица 4.3

Допустимые значения напряжения прикосновения для электроустановок 110–750 кВ

Нормируемая величина	Продолжительность воздействия t_k , С					
	0,1	0,2	0,5	0,7	1	1–5
U_{np} , В	500	400	200	130	100	65

Продолжительность воздействия тока на человека (t_k) принимается равной сумме времени действия защиты и полного времени отключения выключателя. При этом для определения допустимого значения напряжения прикосновения у рабочих мест, где при производстве персоналом оперативных переключений может возникнуть КЗ, следует принимать время действия резервной защиты, а для остальной территории – основной защиты [1].

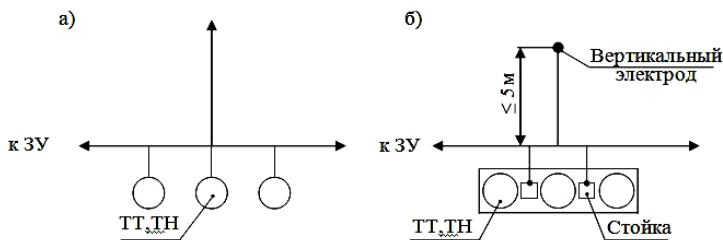
Величина допустимого напряжения на ЗУ при стекании с него тока замыкания на землю не должна превышать величин, указанных в табл. 4.2.

Конструктивно ЗУ выполняется подобно ЗУ, выполненному по норме на допустимое сопротивление с тем отличием, что продольные и поперечные горизонтальные заземлители размещаются на расстояниях не более 30 м. Эти расстояния в конкретных ЭУ определяются требованиями ограничения напряжения прикосновения до нормированных значений и удобством присоединения заземляемого оборудования.

Глубина заложения горизонтальных заземлений не должна быть менее 0,3 м. Только у рабочих мест допускается меньшая глубина заложения, если на них не установлена потенциал-выравнивающая решетка.

Потенциало-выравнивающая решетка представляет собой заземлитель в виде квадрата размером 1 м с ячейками сетки 0,5 м. Она укладывается на глубине 0,1–0,2 м и по кратчайшему пути присоединяется к металлоконструкциям ручного привода. В центре решетки может устанавливаться вертикальный электрод длиной 3–5 м.

Присоединение оборудования и конструкций к ЗУ выполняется с помощью заземляющих проводников, присоединяемых сваркой к горизонтальным заземлителям и болтами или сваркой к заземляемым элементам оборудования и конструкциям ЭУ. Поскольку каждый вид оборудования имеет специфические особенности работы, то и заземление конкретного вида оборудования имеет свою специфику. Подробно о заземлении конкретных видов оборудования указывается в [2]. Однако общим здесь является то, что каждая стойка опорной конструкции любого оборудования должна иметь отдельное соединение с заземляющей сеткой. При этом в месте соединения должно быть обеспечено растекание тока, не менее чем по трем направлениям (рис. 4.3).



а – каждый аппарат установлен на отдельной стойке;

б – аппараты установлены на двух стойках (в качестве одного из направлений использован лучевой заземлитель с вертикальным электродом в конце луча длиной 5 м).

Рис. 4.3. Схема заземления ТТ и ТН

4.3. Требования к ЗУ электроустановок напряжением выше 1 кВ с незаземленной нейтралью или заземленной через дугогасящие реакторы

В сетях незаземленных или заземленных через дугогасящие реакторы нормируется напряжение на ЗУ электроустановки ($U_{зв}$) при

стекании с него тока замыкания на землю. Величина этого напряжения не должна превышать 250 В, если ЗУ используется только для ЭУ напряжением выше 1 кВ. Если ЗУ одновременно используется для электроустановок напряжением до 1 кВ – то величина напряжения на ЗУ не должна быть больше 125 В.

Сопротивление ЗУ в конкретном случае определяется из выражения:

$$R_3 = \frac{250}{I_3}; \quad (4.1)$$

но не более 10 Ом; или

$$R_3 = \frac{125}{I_3}; \quad (4.2)$$

но не более 4 Ом (при напряжении ЭУ до 1 кВ равном 380/220 В).

Конструктивно ЗУ на территории ОРУ напряжением выше 1 кВ с незаземленной нейтралью или заземленной через дугогасящие реакторы выполняется подобно как и для ЭУ с эффективно-заземленной нейтралью. Вокруг площади, занятой подлежащим заземлению оборудованием на расстоянии 0,8–1 м от его фундаментов в земле на глубине 0,5–0,7 м прокладывается замкнутый горизонтальный заземлитель. Если площадь ЭУ велика (больше чем 20x20 м²) то прокладывают дополнительно поперечные элементы горизонтальной заземляющей сетки в удобных местах между оборудованием. Их число должно быть не менее четырех, а расстояния между ними не должны превышать 20 м. При необходимости контурный горизонтальный заземлитель дополняется вертикальными электродами.

4.4. Конструктивное исполнение заземляющих устройств в закрытых РУ, зданиях пунктов управления и релейных щитов

Заземляющее устройство для заземления оборудования электроустановок, расположенных в зданиях (ЗРУ, ОПУ, РЩ, ГЩУ и др.) состоит из контурного заземлителя и заземляющей сетки [2]. Контурный заземлитель может быть расположен вокруг здания на расстоянии 1 м от его стен и на глубине 1 м в земле или в земле внутри здания. В качестве контурного заземлителя рекомендуется исполь-

зовать электрически непрерывную арматуру фундаментов здания [3, 4].

В случае, когда контурный заземлитель выполнен вокруг здания, а отмостка здания бетонная – то в месте входа или въезда в здание на контурном заземлителе устанавливают по одному вертикальному электроду длиной 3–5 м с обеих сторон входа или въезда. Если отмостка шириной не менее 1,5 м выполнена из асфальта – вертикальные электроды у входов не устанавливают.

В качестве элементов заземляющей сетки внутри здания используют металлоконструкции под оборудование и элементы кабельных конструкций. Дополнительно на первом этаже зданий в бетонных полах прокладывают горизонтальные заземлители со стороны обслуживания оборудования. Все элементы заземляющей сетки должны быть многократно соединены между собой и не в менее чем в четырех местах присоединены к контурному горизонтальному заземлителю.

Заземление оборудования, расположенного на первом этаже здания осуществляют путем соединения подлежащих заземлению его частей с заземляющей сеткой.

Заземление оборудования, расположенного на этажах выше первого выполняют с помощью магистралей заземлений, прокладываемых на стенах здания с учетом удобства присоединения оборудования. Концы магистралей заземлений должны присоединяться к ЗУ здания двумя – тремя вертикальными спусками. Если в здании находятся устройства РЗА, ПА и АСУ ТП, то создается шина заземления, прокладываемая вдоль стен помещения около пола (на высоте не более 0,5 м). Шина заземления образует замкнутую петлю, которую соединяют с ЗУ не менее чем двумя проводниками того же сечения, расположенными на наибольшем расстоянии друг от друга. К шине заземления присоединяют металлоконструкции и корпуса оборудования находящегося в помещении, заземляющие проводники, экраны и свободные жилы кабелей, выходящих из помещения.

Рабочее заземление устройств РЗА, ПА, АСУ ТП осуществляют путем присоединения их рабочих точек отдельным проводником к клеммам защитного заземления. Клеммы защитного заземления

обычно установлены на рамных конструкциях, которые и выполняют роль заземляющих проводников.

Ряды рамных конструкций (панелей, пультов и т. д.) соединяют между собой по концам и в промежуточных точках с шагом не более 5 м проводником сечением не менее 100 мм^2 . Общая рамная конструкция присоединяется не менее чем в трех точках к контурному заземлителю.

В местах входа в здание кабельных каналов вторичных цепей на контурном заземлителе устанавливают по одному вертикальному электроду длиной 5 м с обеих сторон. Если необходимо снижение уровня помех от высокочастотных электромагнитных полей, то выполняется специальное экранирование контрольных кабелей. Для этого на глубине 0,1–0,15 м по всей трассе кабельного канала под лотками или с обеих сторон лотков в непосредственной близости от них прокладывают два экранирующих заземлителя. Экранирующие заземлители с одного конца тросы кабельного канала присоединяют к ЗУ возле оборудования ОРУ, на другом конце лотков – к контурному заземлителю, прокладываемому вокруг здания и к рамным конструкциям в нем (рис. 4.4).

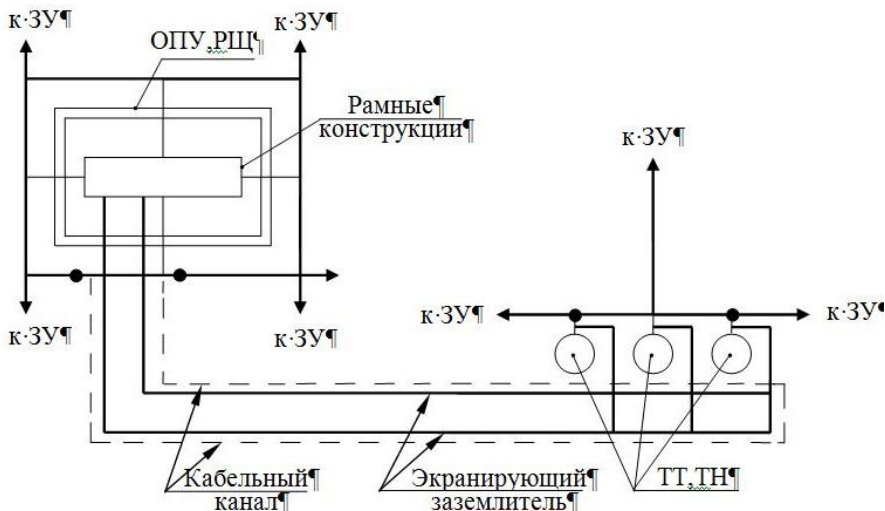


Рис. 4.4. – Схема экранирования контрольных кабелей от ТТ и ТН по условию снижения уровня помех

В зданиях, где имеются металлические конструкции различных инженерных коммуникаций, требуется уравнивание потенциалов между ними. Для этого все металлические части оборудования, коммуникаций, строительных конструкций, кабельные конструкции, стеллажи, лотки соединяются электрически между собой проводниками сечением не менее 6 мм^2 . Металлические части системы центрального отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха соединяют между собой на вводе в здание.

Если требуется установленное внутри здания оборудование защитить от внешних высокочастотных полей, то выполняют экранирование строительных конструкций. Для этого чаще всего применяют закладку в стены, пол и потолок сетки из стальных проводников. Защитная сетка должна иметь размер ячейки $0,1-0,2 \text{ м}$, а диаметр стальной проволоки $4-5 \text{ мм}$. Между собой защитные сетки, прокладываемых по полу, потолку и каждой стене соединяют проводниками с расстоянием не более 1 м . К шине заземления металлические сетки присоединяют проводниками, с расстояниями между ними не более 5 м .

Если здания ЗРУ, релейных щитов, ОПУ, узлов связи ЭС и ПС располагаются между территориально разобщенными ОРУ разного напряжения, то их контурный заземлитель присоединяется к связям между ЗУ ОРУ (рис. 4.1,в). В случае расположения указанных зданий за пределами территории ЭУ их контурный заземлитель соединяется кратчайшим путем с ЗУ ОРУ не менее чем двумя связями. Расстояние между связями должно быть не менее 3 м .

При наличии кабельной трассы, связывающей здания и сооружения с оборудованием ОРУ, допускается прокладка горизонтальных заземлителей – связей по обеим сторонам кабельной трассы на глубине 1 м .

4.5. Выбор сечений элементов заземляющих устройств

Заземляющие устройства ЭУ проектируют на срок службы 25 лет . Чтобы в течение всего срока службы ЗУ обеспечивало требуемые параметры, необходимо сечение заземляющих проводников выбирать исходя из требований к механической прочности, коррозионной и термической стойкости.

Коррозионному воздействию подвергаются стальные элементы ЗУ, находящиеся в земле. Оцинкованные или омедненные элементы разрушаются гораздо меньше, чем стальные, но они дороже. Основным фактором, который влияет на коррозионное воздействие является удельное сопротивление грунта ρ_2 (не эквивалентное сопротивление земли!), в котором они расположены. Сведения об удельном сопротивлении грунта можно получить, выполняя геофизические изыскания пород грунта или в результате измерений на месте по методу пробного электрода [2].

Зависимость коррозионной активности грунта от его удельного сопротивления приведена в табл. 4.4 [2].

Таблица 4.4

Зависимость коррозионной активности грунта от его удельного сопротивления

Порода грунта	Удельное сопротивление ρ_2 , Ом·м	Коррозионная активность
Засоленный грунт	до 5	Весьма высокая
Глина, торф	5–10	Высокая
Суглинок	10–20	Повышенная
Супесь	20–100	Средняя
Песок	более 100	Низкая

Сечение вертикальных электродов ЗУ выбирается только по их механической прочности и коррозионной стойкости согласно табл. 4.5.

Таблица 4.5

Минимальное сечение заземлителей в зависимости от агрессивности грунтов

Коррозионная активность грунта	Рекомендуемый диаметр заземлителей, мм		Допустимые к применению заземлители, мм	
	Вертикальные	Горизонтальные	Вертикальные	Горизонтальные
1	2	3	4	5
Весьма высокая	16	16	–	Стальная полоса 30x10

Окончание табл. 4.5

1	2	3	4	5
Высокая	16	14	–	Стальная полоса 30x8
Повышенная Средняя	12 – (для мягких грунтов; для грунтов средней твердости – 16)	12	Уголок 63x63x6	Стальная полоса 30x6
Низкая	для мягких грунтов – 12	12	Уголок 50x50x5; 63x63x6	Стальная полоса 30x4

Горизонтальные элементы и заземляющие проводники (спуски) дополнительно проверяются на термическую стойкость. При этом предполагается, что через заземляющие проводники (спуски) протекает полный ток однофазного КЗ (I_K^1), а через горизонтальные элементы ЗУ – его половина (вследствие растекания тока по минимально возможным двум направлениям).

Допустимое сечение заземляющих проводников (S_{don1}) равно:

$$S_{don1} = \frac{I_K^1 \cdot \sqrt{t_K}}{70}, \text{ мм}^2, \quad (4.3)$$

где I_K^1 – полный ток однофазного замыкания на землю, А;

t_K – время протекания тока однофазного КЗ в секундах, равные суммарному времени срабатывания основной защиты и полного времени отключения выключателя.

Допустимое сечение горизонтальных элементов ЗУ (S_{don2}):

$$S_{don2} = \frac{I_K^1 \cdot \sqrt{t_K}}{140}, \text{ мм}^2. \quad (4.4)$$

Необходимо, чтобы сечение заземляющих проводников (S_1) и сечение горизонтальных элементов (S_2) были больше или равны допустимым значениям:

$$S_1 \geq S_{don1}; \quad S_2 \geq S_{don2}. \quad (4.5)$$

4.6. Определение сопротивления естественных заземлителей, имеющих на территории ЭУ, где сооружается ЗУ

При проектировании заземляющих устройств РУ электростанций и подстанций в качестве естественных заземлителей используются молниезащитные тросы ЛЭП (система «ТРОС-ОПОРА»), кабели с металлической оболочкой или броней, неизолированные от земли трубопроводы, арматура фундаментов опор ОРУ и др. [1].

Сопротивление системы «ТРОС-ОПОРА» (R_{em-o}) зависит от сопротивления заземления опоры, сопротивления самого троса, длины пролета между опорами и числа линий [2]:

$$R_{em-o} = \frac{\sqrt{R_{оп} \cdot Z_T \cdot l_T \cdot 10^{-3}}}{n_{лэп}}, \text{ Ом}; \quad (4.6)$$

где $R_{оп}$ – среднее сопротивление заземления опор (15 Ом при $\rho_z = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$);

Z_T – сопротивление грозотроса, Ом/км (см. табл. 4.6);

l_T – средняя длина пролета, м, (250–400);

$n_{лэп}$ – число отходящих ЛЭП.

Таблица 4.6

Сопротивление грозотросов

Марка провода	ТК-50	ТК-70	АС-70	АС-120	АС-150	АС-185	АС-300	АС-400
Z_T , Ом/км	3,0	2,0	0,8	0,78	0,77	0,75	0,73	0,72

Сопротивление стекания тока с оболочек кабелей:

$$R_{ек} = 0,01 \cdot \rho_{1n} \cdot R_k, \text{ Ом}, \quad (4.7)$$

где ρ_{1n} – удельное сопротивление слоя грунта, в котором проложен кабель (в расчетное время года), Ом·м;

R_k – сопротивление оболочек кабелей в грунте с удельным сопротивлением 100 Ом·м (см. табл. 4.7).

Таблица 4.7

Сопротивление стеканию тока с оболочек кабелей в грунте
с $\rho=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

Число кабелей, шт.	1	2	3	более 3
$R_k, \text{ Ом}$	2,0	1,5	1,2	1,0

Сопротивление стекания тока с неизолированного трубопровода зависит сложным образом от сопротивления грунта, длины и диаметра трубопровода. Для водогазопроводной трубы R_{emp} при удельном сопротивлении грунта $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ находятся в пределах $0,25\text{--}0,5 \text{ Ом}$. Если ρ на территории ЭУ отличается от $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, то значение R_{emp} умножается на величину $\rho/100$.

Сопротивление фундаментов опор ОРУ (R_{eon}) определяется расчетом [3,4]. В учебном проектировании ЗУ допускается его не учитывать.

Для ОРУ 110–330 кВ электростанций в качестве естественных заземлителей необходимо учитывать сопротивление ЗУ самой электростанции, а также отходящих от нее металлических трубопроводов. Величина сопротивления ЗУ самой электростанции должна быть рассчитана или измерена. В случае невозможности выполнения этого допустимо величину суммарного сопротивления ЗУ электростанции принимать равной [2]:

$$R_{ec} = 0,15 \text{ Ом}. \quad (4.8)$$

Когда же на территории ЭУ имеется несколько РУ разных классов напряжения, то их ЗУ электрически соединяют между собой горизонтальными заземлителями – связями. Количество этих связей (по ПУЭ не менее 4) выбирается с учетом величины протекающих между РУ частей токов замыкания на землю. Эти токи могут приводить к термическому повреждению протяженных проводящих коммуникаций (экранов и оболочек кабелей, труб, воздухопроводов и др.), а также оказывать опасное влияние на устройства РЗА, ПА и АСУ ТП (при протекании по оболочкам и экранам контрольных кабелей вторичных цепей, проложенных между РУ). Величины допустимых токов в экране контрольного кабеля определяется допу-

стимым напряжением между жилой кабеля и корпусами вторичных устройств. Методика расчета необходимого числа связей приводится в [2].

В учебном проектировании для упрощения следует принимать число этих связей равное четырем.

При расчете сопротивления ЗУ каждого из РУ необходимо учитывать сопротивления ЗУ соседних РУ. Для первоначального расчета их можно учитывать величиной нормируемого сопротивления ЗУ каждого из них, складывая их параллельно с имеющимися на рассчитываемом РУ сопротивлениями естественных заземлителей. При необходимости уточнения расчетов, после определения значений сопротивления стеканию тока с ЗУ каждого РУ в уточняющем расчете вместо нормируемых сопротивлений ЗУ соседних РУ нужно использовать рассчитанные их значения.

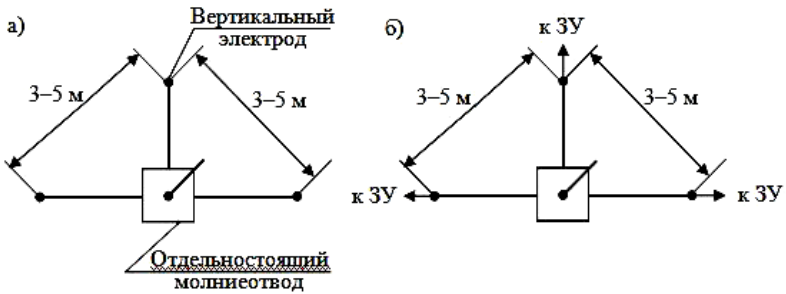
Результирующее сопротивление всех естественных заземлителей, имеющихся на территории ЭУ определяется по выражению:

$$R_{рез.е} = \frac{1}{\frac{1}{R_{ем-о}} + \frac{1}{R_{ек}} + \frac{1}{R_{емр}} + \frac{1}{R_{еоп}} + \frac{1}{R_{ЗУсоседн.РУ}}}, \text{ Ом}; \quad (4.9)$$

где $R_{ЗУсоседн.РУ}$ – сопротивление ЗУ соседнего РУ, Ом.

4.7. Конструктивное исполнение заземления молниеотводов ОРУ

Защита оборудования ОРУ электроустановок с любым способом заземления нейтралей от ударов молнии осуществляется совокупностью заземленных отдельно стоящих молниеотводов и молниеотводов, установленных на порталах. Заземление отдельно стоящих молниеотводов выполняется отдельно от ЗУ электроустановки (рис. 4.5, а) либо, при необходимости, присоединяется к нему не менее чем 3 связями (рис. 4.5, б). Молниеотводы, установленные на порталах, присоединяются к ЗУ по обеим стойкам портала (рис. 4.5, в).



- а – заземление отдельностоящего молниеотвода, не присоединенного к ЗУ;
 б – заземление отдельностоящего молниеотвода, присоединенного к ЗУ;
 в – заземление молниеотвода, установленного на портале.

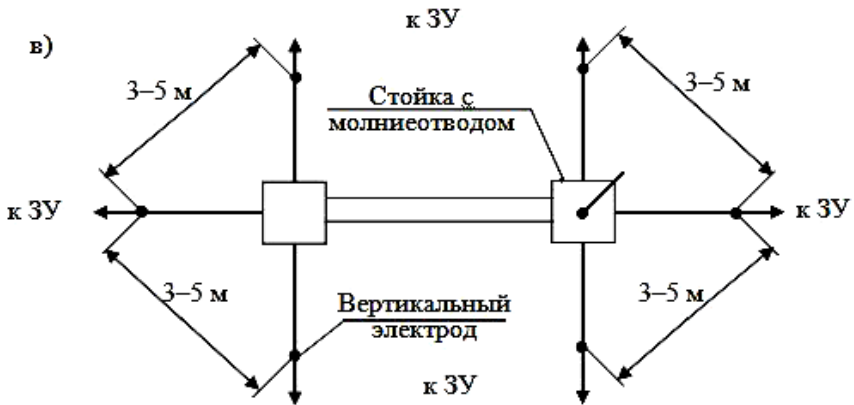


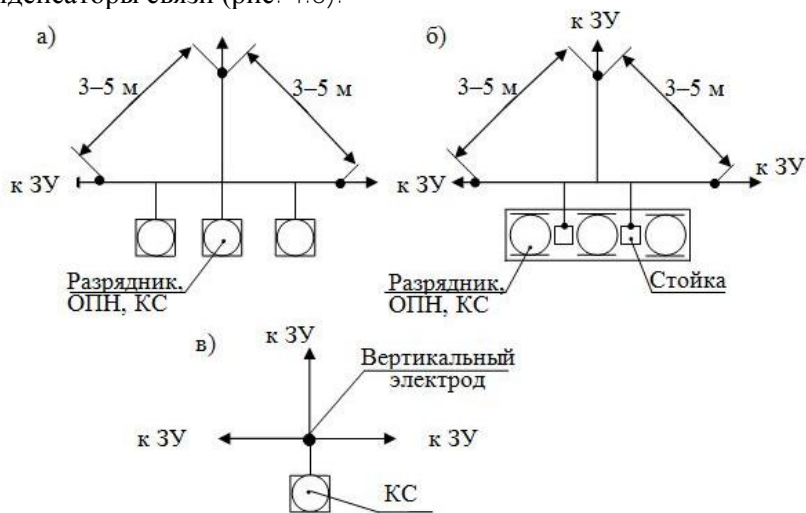
Рис. 4.5. Схема заземления молниеотводов

При прямом ударе молнии в молниеотвод в землю стекает импульсный ток, образующий в земле две характерные зоны повышенного импульсного потенциала: искровую и стримерную зоны. Искровая зона является областью с высокой проводимостью и характеризуется повышенным потенциалом. Для средних условий радиус искровой зоны составляет около 2 м [2]. Стримерная зона характеризуется наличием проводящих стримеров, направленных

во все стороны от искровой зоны. Радиус стримерной зоны при тех же условиях – порядка 5 м.

Для снижения возникающих напряжений на ЗУ необходимо уменьшить импульсное сопротивление заземления. Это возможно путем создания путей растекания импульсного тока по магистралям заземления по трем-четырем направлениям.

В этой связи в земле прокладывают лучевые горизонтальные заземлители и на каждом из них, допуская на двух из них, на расстоянии 3–5 м от стойки устанавливают вертикальный электрод длиной 3–5 м. Расстояние между вертикальными электродами должно быть не менее 3–5 м (рис. 4.5). Для молниеотводов, устанавливаемых на порталах лучевые заземлители присоединяются к ЗУ ОРУ (рис. 4.5,в). Аналогично заземляются разрядники, ОПН и конденсаторы связи (рис. 4.6).



а – каждый аппарат установлен на отдельной стойке;

б – аппараты установлены на двух стойках;

в – отдельностоящий конденсатор связи.

Рис. 4.6. – Схема заземления разрядников, ОПН, КС

Возникающие потенциалы в искровой и стримерной зонах опасны для изоляции кабелей, проложенных на территории ОРУ. Прокладка кабелей в искровой зоне не допускается. В стримерной зоне

прокладка кабелей допускается при выполнении одного из двух способов защиты:

- с помощью системы перехвата тока молнии;
- при прокладке кабелей в изоляционных трубах или коробах.

Система перехвата тока молнии представляет собой проложенный в земле между молниеотводом и кабелем стальной проводник (барьерный заземлитель), который по концам присоединяется к специально устраиваемым или существующим заземлителям. Барьерный заземлитель снижает импульсный потенциал в зоне прокладки кабеля.

Прокладка кабеля в изоляционной трубе (коробе) при достаточной импульсной прочности самой трубы (короба) позволяет снизить величину воздействующего на кабель импульсного потенциала до допустимого значения. Длина изоляционной трубы определяется расчетом [2].

5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 кВ

Для проектирования ЗУ необходимы следующие исходные данные:

– способ заземления нейтрали ЭУ; ток замыкания на землю и продолжительность его протекания, удельное сопротивление слоев земли и глубина верхнего слоя; сопротивление естественных заземлителей, имеющих на территории РУ; план ЭУ (РУ) с указанием размещения фундаментов под оборудование, молниеотводов, силовых трансформаторов; зданий ЗРУ (релейных щитов, ОПУ) и других сооружений, имеющих на территории электроустановки; перспектива развития РУ.

5.1. Последовательность проектирования ЗУ

По исходным данным проектирование ЗУ выполняется в следующей последовательности:

1. В соответствии с требованиями и рекомендациями ПУЭ (см. раздел 4) для заданной ЭУ разрабатывают предварительную конфигурацию заземлителя (базовый заземлитель) с учетом его размещения на территории ОРУ и удобства подключения заземляющих оборудование проводников. Для этого на плане ЭУ намечают места прокладки продольных и поперечных горизонтальных заземлителей, устанавливают глубину их заложения, форму и размеры поперечного сечения (см. раздел 4. 5). Разрабатывают: схемы присоединения оборудования и элементов конструкций, подлежащих заземлению, с заземляющей сеткой; схемы заземления вторичных устройств и защиты их от электромагнитных помех; решения по выравниванию потенциалов (в зданиях РЩУ); заземлению молниеотводов и др.

Если в ЭУ имеется несколько РУ разных напряжений, то базовый заземлитель разрабатывают для каждого из них. Далее отмечают места расположения и количество связей между ЗУ РУ разных напряжений и с ЗУ зданий, имеющих на территории ЭУ.

В случае, когда изначально предполагается дополнение горизонтальной сетки вертикальными электродами – выбирают их длину, сечение и намечают места расположения по контуру горизонтальной сетки.

2. Производят расчет электрических параметров базового заземлителя. Для этого по исходным данным определяют расчетное приведенное удельное сопротивление слоев земли (см. раздел 2), величину расчетного тока стекающего с заземлителя при замыкании на землю (см. раздел 3). Если в ЭУ имеется несколько РУ разных напряжений, то для каждого из них определяют расчетный ток стекающий с заземлителя. По схеме базового заземлителя рассчитывают общую длину горизонтального заземлителя (L_c), его периметр (L_n) и занимаемую площадь (S).

Рассчитывают электрические параметры ЗУ (R_z , U_z , U_{np} – см. раздел 5.2–5.4).

Если расчетные параметры меньше или равны нормируемым значениям – выполняют чертеж ЗУ.

В случае, когда рассчитанные значения параметров превышают нормируемые величины, производят модификацию разработанной конфигурации заземлителя: увеличивают количество поперечных горизонтальных заземлителей и их суммарную длину, либо выполняют контурный заземлитель, выходящий за пределы заземляющей сетки; или увеличивают количество вертикальных заземлителей и их длину или применяют глубинные заземлители; либо используют дополнительные естественные заземлители и т. п. Повторно производят расчет электрических параметров этого модифицированного заземлителя и, если результаты снова не соответствуют требуемым, то конструкцию ЗУ еще раз перерабатывают, снова производят расчет и так до тех пор пока расчетные значения параметров ЗУ не будут соответствовать нормируемым.

3. Заземлитель, удовлетворяющий требованиям ПУЭ, принимают как окончательное решение. По его схеме разрабатывают чертеж проектируемого ЗУ и оформляют расчетно пояснительную записку.

5.2. Расчет электрических параметров ЗУ в электроустановках выше 1 кВ с незаземленной нейтралью или заземленной через дугогасящие реакторы

Расчет производится в следующем порядке

1. В соответствии с требованиями ПУЭ и исходными данными принимают допустимое напряжение на заземлителе ($U_{зп}$) и определяют его нормируемое предельное сопротивление ($R_{з.н}$). В случае совмещения ЗУ для ЭУ разного напряжения из нескольких нормируемых значений принимают меньшее по величине.

2. Рассчитывают результирующее сопротивление естественных заземлителей, имеющихся на территории ЭУ (R_e). Для этого заданные значения сопротивлений естественных заземлителей складывают параллельно.

3. Если $R_e < R_{з.н}$, то вертикальных электродов не требуется и на территории ЭУ по контуру прокладывают горизонтальный замкнутый заземлитель, с которым связывают все естественные заземлители не менее чем двумя связями.

4. Если $R_e > R_{з.н}$, то необходимо сооружение искусственного заземлителя, величина сопротивления стеканию тока с которого:

$$R_{иск} = \frac{R_e \cdot R_{з.н}}{R_e - R_{з.н}}, \text{ Ом}; \quad (5.1)$$

5. В соответствии с рекомендациями (раздела 4) разрабатывают предварительную конфигурацию заземлителя и рассчитывают сопротивление горизонтальной сетки ($R_{з.г}$), проложенной на глубине t [3]:

$$R_{з.г} = 0,44 \cdot \frac{\rho_{эКВ}}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_{эКВ}}{L_z}, \quad (5.2)$$

где S – площадь заземлителя, м^2 ;

L_z – суммарная длина горизонтального заземлителя, м;

$\rho_{эКВ}$ – эквивалентное удельное сопротивление грунта, Ом·м.

Для однородных электрических структур земли

$$\rho_{эКВ} = K_c \cdot \rho_3.$$

Для двухслойной земли:

$\rho_{экв}$ – определяется по данным табл. 5.1;

K_c – принимают по табл. 2.3;

ρ_{1n}, ρ_{2n} – расчетные приведенные удельные сопротивления первого и второго слоев земли (см. раздел 2).

Таблица 5.1

Относительное эквивалентное сопротивление земли
 $\rho_{экв} / \rho_{2n}$ для горизонтальной заземляющей сетки
 (без вертикальных электродов) [3].

ρ_{1n} / ρ_{2n}	L_z / \sqrt{S}	$\rho_{экв} / \rho_{2n}$ при $\frac{h-t}{\sqrt{S}}$							
		0,00625	0,0125	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	1
0,125	4	0,57	0,51	0,45	0,38	0,3	0,24	0,19	0,125
0,125	6	0,64	0,58	0,51	0,44	0,36	0,28	0,21	0,125
0,125	10	0,73	0,64	0,59	0,5	0,41	0,32	0,23	0,125
0,125	18	0,68	0,72	0,64	0,56	0,45	0,35	0,25	0,125
0,25	4	0,67	0,62	0,57	0,51	0,45	0,39	0,33	0,25
0,25	6	0,74	0,69	0,63	0,57	0,5	0,43	0,35	0,25
0,25	10	0,80	0,75	0,69	0,63	0,55	0,46	0,38	0,25
0,25	18	0,85	0,81	0,74	0,58	0,6	0,50	0,40	0,25
0,5	4	0,81	0,77	0,72	0,71	0,66	0,61	0,58	0,50
0,5	6	0,86	0,83	0,79	0,75	0,71	0,66	0,59	0,50
0,5	10	0,9	0,87	0,83	0,8	0,74	0,68	0,61	0,50
0,5	18	0,92	0,89	0,86	0,83	0,77	0,7	0,63	0,50
20	4	1,28	1,38	1,45	1,55	1,67	1,73	1,82	2,00
20	6	1,23	1,29	1,4	1,43	1,51	1,64	1,72	2,00
20	10	1,16	1,2	1,3	1,33	1,45	1,57	1,67	2,00
20	18	1,11	1,15	1,19	1,25	1,35	1,46	1,65	2,00
40	4	1,88	2,18	2,37	2,56	2,85	3,10	3,40	4,00
40	6	1,67	1,92	2,00	2,24	2,48	2,80	5,20	4,00
40	10	1,47	1,60	1,70	1,94	2,20	2,50	3,00	4,00
40	18	1,27	1,37	1,50	1,7	1,95	2,35	2,85	4,00
80	4	3,16	3,88	4,25	4,75	5,3	5,85	6,40	8,00
80	6	2,50	2,90	3,40	3,90	4,45	5,20	5,90	8,00
80	10	2,06	2,30	2,80	3,14	3,70	4,50	5,50	8,00
80	18	1,65	1,85	2,20	2,54	3,16	4,05	5,25	8,00

6. Если сопротивление горизонтальной сетки меньше необходимого сопротивления искусственного заземления ($R_{з.г} < R_{иск}$), то вертикальных заземлителей не требуется.

При $R_{з.г} > R_{иск}$ необходимы вертикальные заземлители. Их устанавливают по периметру сетки (с обязательной установкой в углах сетки) на равном расстоянии (a) друг от друга. Рекомендуемые расстояния между вертикальными заземлителями выбираются по табл. 5.2.

Таблица 5.2

$\frac{l_г}{\sqrt{S}}$	$\geq 0,5$	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	$< 0,05$
$\frac{a}{l_г}$	0,5	0,8	1,0	1,0	2,0	3,0	3÷4

Число вертикальных заземлителей N равно

$$N = \frac{L_n}{a},$$

где L_n – длина периметра заземляющей сетки, м;

a – расстояние между вертикальными заземлителями, м.

Диаметр вертикальных заземлителей определяется по табл. 4.5.

7. Рассчитывают сопротивление заземлителя с вертикальными электродами [3]:

$$R_{\rhoз} = A \cdot \frac{\rho_{экв}}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_{экв}}{L_г + N \cdot l_г}, \quad (5.3)$$

где A – коэффициент определяемой по табл. 5.3;

$\rho_{экв}$ – эквивалентное удельное сопротивление грунта, Ом·м.

Таблица 5.3

$\frac{l_г}{\sqrt{S}}$	0,03	0,06	0,12	0,24	0,5
A	0,42	0,39	0,36	0,32	0,26

Для двухслойной земли и заземляющей сетки с вертикальными электродами $\rho_{экв}$ определяется по данным таблицы 5.4.

Таблица 5.4

Относительное эквивалентное сопротивление земли $\rho_{экв}/\rho_{2n}$ для расчета сопротивления заземляющих сеток с вертикальными электродами

ρ_{1n}/ρ_{2n}	$a/l_г$	$\rho_{экв}/\rho_{2n}$ при $\frac{h-t}{l_г}$						
		0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	0,95
0,125	0,5	0,95	0,90	0,80	0,70	0,62	0,54	0,52
0,25	0,5	0,97	0,93	0,85	0,78	0,71	0,65	0,64
0,5	0,5	0,99	0,96	0,92	0,88	0,83	0,79	0,77
2,0	1	1,02	1,03	1,05	1,10	1,15	1,30	1,40
2,0	2	1,03	1,07	1,10	1,13	1,15	1,32	1,50
2,0	4	1,05	1,17	1,13	1,15	1,20	1,38	1,60
5,0	1	1,05	1,10	1,15	1,22	1,35	1,36	2,40
5,0	2	1,22	1,26	1,35	1,43	1,54	2,12	2,70
5,0	4	1,33	1,41	1,50	1,65	1,83	2,60	3,50
10,0	1	1,10	1,19	1,28	1,38	1,62	2,50	3,70
10,0	2	1,30	1,40	1,50	1,60	1,80	2,75	5,50
10,0	4	1,52	1,70	1,88	2,08	2,33	3,52	6,00

8. Если расчетное значение R_{pz} меньше требуемого $R_{иск}$, то далее выполняют пункт 3 раздела 5.1.

При $R_{pz} > R_{иск}$ проводят модификацию заземлителя, увеличивая длину горизонтального заземлителя, либо количество вертикальных электродов или их длину. Расчет повторяют для модифицированного базового заземлителя и так далее до тех пор, пока расчетное сопротивление заземлителя R_{pz} не будет меньше или равно требуемому сопротивлению $R_{иск}$.

Далее выполняют рекомендации пункта 3 раздела 5.1.

9. Напряжение на заземлителе при стекании с него тока замыкания на землю будет равно:

$$U_3 = I_3 \cdot R_{pz}. \quad (5.4)$$

Это расчетное напряжение на заземлителе должно быть меньше допустимого, установленного в разделе 4.3:

$$U_3 \leq U_{3н}. \quad (5.5)$$

5.3. Расчет электрических параметров ЗУ в установках с эффективно-заземленной нейтралью, выполняемое по норме на допустимое сопротивление

Заземляющее устройство электроустановок с эффективно-заземленной нейтралью, выполняемое по норме на допустимое сопротивление в любой сезон года должно иметь сопротивление не более 0,5 Ом т. е. $R_{3н} = 0,5$ Ом. Расчет электрических параметров составленного по рекомендациям пункта 1 раздела 5.1 [5] базового заземлителя производят в следующей последовательности:

1. Рассчитывают результирующее сопротивление естественных заземлителей, имеющих на территории ЭУ ($R_{рез.е}$). Для этого их значения складывают параллельно.

2. Определяют требуемое сопротивление искусственного заземлителя:

$$R_{иск} = \frac{R_{рез.е} \cdot R_{3н}}{R_{рез.е} - R_{3н}}, \text{ Ом}; \quad (5.6)$$

3. Рассчитывают сопротивление стеканию тока с разработанного базового заземлителя, состоящего только из горизонтальных заземлителей [5]:

$$R_3 = 0,866 \cdot \frac{\rho_{2н}}{\sqrt{S}} \cdot \left(\frac{\rho_{1н}}{\rho_{2н}} \right)^C + \frac{\rho_{1н}}{L_2}, \text{ Ом}; \quad (5.7)$$

где S – площадь заземляющего устройства, м^2 ;

$\rho_{1н}$, $\rho_{2н}$ – расчетные сопротивления первого и второго слоев земли, Ом·м (см. раздел 2);

L_2 – суммарная длина горизонтальных электродов базового заземлителя, м;

$$C = \frac{2 \cdot h_{1н}}{\sqrt{S}};$$

$h_{1н}$ – приведенная глубина верхнего слоя земли, м.

4. Если расчетное значение R_3 меньше требуемого сопротивления искусственного заземлителя $R_{иск}$, то вертикальных электродов не требуется и переходят к выполнению пункта 3 раздела 5.1.

5. Если расчетное значение R_3 больше $R_{иск}$, то горизонтальную сетку требуется дополнить вертикальными заземлителями, устанавливаемыми по контуру сетки. Длина вертикальных заземлителей l_B обычно принимается равной 5 м, а расстояние между ними определяется по данным табл. 5.2. Количество вертикальных заземлителей:

$$N = \frac{L_n}{a} \quad (5.8)$$

Принимают ближайшее целое четное число заземлителей.

6. Рассчитывают сопротивление стеканию тока с заземлителя, состоящего из горизонтальной сетки и ряда вертикальных электродов, установленных по периметру сетки [5]:

$$R_3 = 0,433 \cdot \frac{\rho_{2n}}{\sqrt{S}} \cdot \left(\frac{\rho_{1n}}{\rho_{2n}} \right)^B + \frac{\rho_{1n}}{L_2 + N \cdot l_e}, \text{ Ом}; \quad (5.9)$$

где $B = \frac{2 \cdot h_{1n}}{\sqrt{S} + N \cdot l_e}$;

$$l_e = h_1 + h_2 \frac{\rho_{1n}}{\rho_{2n}}, \text{ м.}$$

h_1, h_2 – части длины вертикального электрода, расположенные соответственно в первом (h_{1n}) и втором слоях земли (рис. 5.1), м.



Рисунок 5.1

7. Если рассчитанное сопротивление R_3 меньше требуемого сопротивления $R_{иск}$, то расчет заканчивают.

В случае, когда $R_3 > R_{иск}$, необходимо модифицировать конструкцию заземлителя:

– увеличить площадь S , длину горизонтального заземлителя, либо количество вертикальных заземлителей и их длину, либо применить глубинные заземлители. Снова рассчитывают сопротивление заземлителя и так поступают до тех пор, пока R_3 не будет равно или меньше требуемого значения т. е. $R_3 \leq R_{иск}$.

8. Для принимаемой конструкции заземлителя определяют напряжение на нем при однофазном КЗ по выражению (5.4). Рассчитанное значение U_3 должно соответствовать требованиям ПУЭ, приводимым в табл. 4.2.

Примечание.

Для расчета сопротивления заземлителя можно использовать и выражения 5.2 и 5.3.

5.4. Расчет электрических параметров ЗУ в электроустановках с эффективно-заземленной нейтралью, выполняемого по норме на допустимое напряжение прикосновения

Проектирование ЗУ по норме на допустимое напряжение прикосновения позволяет уменьшить расход проводникового материала для его сооружения и снизить трудозатраты по сравнению с конструкцией ЗУ, выполненного по норме на допустимое сопротивление.

1. Проектирование ЗУ начинается с разработки его базовой конструкции. Для этого используется план электроустановки и данные раздела 4. По составленной базовой конструкции (предварительной конфигурации) определяют общую длину горизонтальных проводников (L_2), длину периметра горизонтальной сетки (L_n) и площадь сетки (S). Принимается длина вертикальных электродов l_6 (обычно 5 м), и их диаметр (по табл. 4.5) и по данным таблицы 5.2 выбирается расстояние между ними (a). По выражению 5.8 определяется количество вертикальных заземлителей.

2. По исходным данным и табл. 4.3 устанавливается нормируемая величина напряжения прикосновения ($U_{np.\partial on}$) для проектируемого ЗУ при продолжительности протекания тока по телу человека, равной сумме времени действия основной защиты ($t_{pz.осн}$) и полного времени отключения выключателя ($t_{отк.в}$)

$$t_k = t_{pz-осн} + t_{отк-в}, с. \quad (5.10)$$

(чаще всего $U_{np.\partial on} = 400 В$).

3. Допустимое напряжение на заземлителя при этом

$$U_{з \partial on} = \frac{U_{np.\partial on}}{\alpha_n \cdot \beta_n}, В \quad (5.11)$$

$$\alpha_n = M \cdot \left(\frac{a\phi \cdot \sqrt{S}}{\ell_в \cdot L_2} \right)^{0,45} \quad (5.12)$$

где α_n – коэффициент напряжения прикосновения:

M – функция отношения удельных сопротивлений первого и второго слоев земли (ρ_{1n}/ρ_{2n}), определяемая по данным табл. 5.5:

Таблица 5.5

ρ_{1n}/ρ_{2n}	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0
M	0,37	0,40	0,46	0,48	0,5	0,60	0,66	0,72	0,76	0,77	0,8	0,82

β_n – коэффициент, определяемый по сопротивлению тела человека (1000 Ом) и сопротивлению растекания тока от его ступней:

$$\beta_n = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot \rho_{1n} + \rho_{nz}}, \quad (5.13)$$

ρ_{nz} – удельное сопротивление поверхностного слоя земли (см. табл. 2.2), Ом·м;

$a\phi = \frac{L\Pi}{N}$ – расчетное расстояние между вертикальными электродами, м.

4. Зная $U_{3 \text{ доп}}$ рассчитывают допустимое сопротивление заземляющего устройства:

$$R_{3 \text{ доп}} = \frac{U_{3 \text{ доп}}}{I_3}, \text{ Ом}, \quad (5.14)$$

где I_3 – расчетный ток, стекающий с заземлителя при однофазном КЗ (см. раздел 3.1), А.

5. Определяют результирующее сопротивление естественных заземлителей $R_{\text{рез.е}}$ (см. выражение 4.8).

6. Определяют необходимое сопротивление искусственного заземлителя:

$$R_{\text{иск}} = \frac{R_{\text{рез.е}} \cdot R_{3 \text{ доп}}}{R_{\text{рез.е}} - R_{3 \text{ доп}}}, \text{ Ом}. \quad (5.15)$$

7. Рассчитывают сопротивление стеканию тока с базового заземлителя (R_3), используя выражение 5.9 (либо 5.3).

Если полученное значение R_3 превышает требуемое значение искусственного заземлителя ($R_3 > R_{\text{иск}}$), то необходимо модифицировать конструкцию базового заземлителя, увеличивая площадь занятую ЗУ (S) соответственно и длину горизонтального заземлителя или число вертикальных заземлителей, или их длину и расчет повторить для модифицированного заземлителя.

8. При $R_3 \leq R_{\text{иск}}$ определяют напряжение на заземлителе и напряжение прикосновения и сопоставляют их с допустимыми значениями

$$\begin{aligned} U_3 &= I_3 \cdot R_3 \leq U_{3 \text{ доп}}, \\ U_{\text{пр}} &= I_3 \cdot R_3 \cdot \alpha_n \cdot \beta_n \leq U_{\text{пр доп}}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

где $U_{3 \text{ доп}}$ – определяют по табл. 4.2.

Если окажется, что напряжение прикосновения и напряжение на заземлителе меньше нормированных значений, то целесообразно увеличить расстояние между горизонтальными заземлителями сетки (но не более 30 м). При этом $U_{\text{пр}}$ и U_3 будут возрастать. Поступая так и каждый раз, повторяя расчет, добиваются, чтобы $U_{\text{пр}}$ и U_3 достигли нормированного значения, даже если сопротивление заземляющей сетки превысит допускаемое $R_{\text{иск}}$.

9. Для окончательно принятого варианта конструктивного исполнения ЗУ определяют допустимое напряжение прикосновения на рабочем месте ($U_{пр.рм}$), принимая продолжительность протекания тока по телу человека равной сумме времени действия резервной защиты и полного времени отключения выключателя (табл. 4.3), (чаще всего $U_{пр.рм}=65$ В).

В случае, когда $U_{пр.рм}$ меньше расчетного значения напряжения прикосновения $U_{пр}$ необходимо, либо изменить конструкцию заземлителя, либо засыпать территорию рабочих мест слоем гравия, или щебня толщиной 15–20 см. Удельное сопротивление поверхностного слоя при этом резко возрастет до 5000–10000 Ом·м. Соответственно возрастет сопротивление растеканию тока со ступней человека и коэффициент β_n уменьшится, что приведет к снижению расчетного напряжения прикосновения (см. выражение 5.16).

6. ПРИМЕР ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗУ ДЛЯ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ 110/10 кВ

Задание. Спроектировать ЗУ по норме на допустимое сопротивление для двухтрансформаторной подстанции 110/10 кВ для условий Республики Беларусь.

Исходные данные.

Подстанция питается по двум воздушным линиям 110 кВ с грозозащитными тросами марки ТК-50. Среднее расстояние между опорами – 250 м. Сопротивление заземления опор – 15 Ом.

РУ 110 кВ подстанции выполнено открытым, по схеме с отделителями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой. На территории подстанции установлены силовые трансформаторы и здание ЗРУ–10 кВ. В здании расположено КРУ–10 кВ, щитовое помещение и комната для ремонтного персонала. План подстанции приведен на рис. 6.1.

На питающих линиях, в их начале, установлены элегазовые выключатели с временем отключения $t_{отк.г} = 0,06$ с. Ток однофазного замыкания на землю на стороне 110 кВ подстанции $I' = 12,3$ кА. Релейная защита выполнена на микропроцессорной элементной базе. Время срабатывания основной защиты $t_{пз.осн} = 0,12$ с, резервной защиты – $t_{пз.рез} = 2,2$ с.

Защита оборудования подстанции от прямых ударов молнии осуществляется молниеотводами. Два из них установлены на приемных порталах и имеют высоту $h_m = 19,35$ м, а два отдельно стоящие, имеющие высоту 24,3 м, располагаются возле силовых трансформаторов.

На территории подстанции характеристики грунта определены вертикальным зондированием. При средней влажности грунта перед проведением ВЭЗ удельное сопротивление первого слоя земли – $\rho_1 = 120$ Ом·м при толщине слоя $h_1 = 2$ м. Удельное сопротивление второго слоя – $\rho_2 = 60$ Ом·м.

От РУ 10 кВ к потребителям отходят 16 кабельных линий. Кабели имеют изоляцию из сшитого полиэтилена. Средняя длина линий 800 м. Емкостный ток замыкания на землю в сети 10 кВ равен 15 А.

Решение.

1. В соответствии с 5.1[1] разработаем предварительную конфигурацию заземлителя ОРУ 110 кВ и КРУ 10 кВ.

Заземлитель ОРУ 110 кВ включает в себя горизонтальную сетку, состоящую из продольных и поперечных заземлителей, проложенных в земле и вертикальных заземлителей. Контур сетки охватывает открыто установленное электрооборудование и располагается на расстоянии 1 м от фундаментов оборудования. Поскольку на подстанции выделены ремонтные площадки, то и на этих площадках также располагаем заземляющую сетку.

При размещении продольных и поперечных заземлителей руководствуемся рекомендациями, изложенными в разделе 4.1.

Поскольку удельное сопротивление верхнего слоя грунта равно 120 Ом·м, а его коррозионная активность низкая (см. табл. 4.4), то предварительно принимаем, что горизонтальные заземлители будут выполнены из стальных прутков диаметром 12 мм. Глубина их заложения $t = 0,7$ м.

Вертикальные заземлители также выполним из стальных прутков диаметром 12 мм. Длина вертикальных электродов $l_6 = 5$ м.

Чертеж базового заземлителя ОРУ приведен на рис. 6.2.

ЗУ ЗРУ 10 кВ выполним по рекомендациям раздела 4.4. В качестве контурного заземлителя используем электрически непрерывную арматуру фундаментов здания. Для заземления шкафов КРУ, панелей РЗА и щитов собственных нужд предусматриваем использование закладных швеллеров помещений.

В помещении РУ–10 кВ кабельные каналы располагаются вдоль 4 стен. Предусматриваем заземляющий контур выполнить по обеим сторонам кабельных каналов из стальной полосы 30х4 мм². К этому контуру присоединяют связи с ЗУ ОРУ 110 кВ и заземляющий контур щитового помещения.

Кабельный канал для контрольных кабелей по территории ОРУ экранируем двумя экранирующими заземлителями, проложенными под лотками. Экранирующие заземлители присоединяются к ЗУ ОРУ–110 кВ по концам канала на ОРУ и в месте входа в здание ЗРУ–10 кВ с арматурой фундаментов здания.

Чертеж ЗУ здания ЗРУ–10 кВ приведен на рис. 6.3.

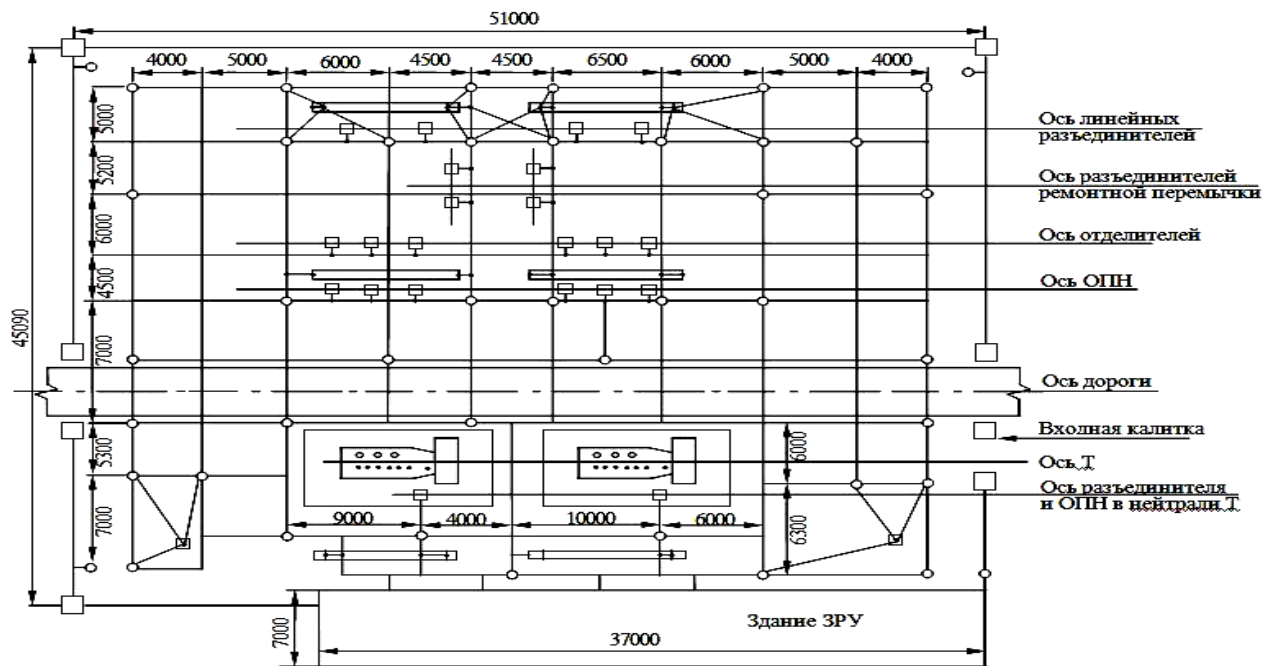


Рис. 6.2. ЗУ двухтрансформаторной ПС 110/10 кВ

2. Определим необходимые исходные данные для расчета параметров ЗУ:

а) по рис. 6.2.

- общая длина горизонтальных заземлителей $L_z=675$ м;
- длина периметра сетки $L_n=172$ м;
- площадь заземляющей сетки – $S=1840$ м²;
- количество вертикальных заземлителей:

$$N = \frac{L_n}{a} = \frac{172}{10} = 17,2,$$

где $a=10$ м – расстояние между вертикальными заземлителями. Определено по табл. 5.2. при

$$\frac{l_g}{\sqrt{S}} = \frac{5}{\sqrt{1840}} = 0,116; \quad a = 2 \cdot l_g = 2 \cdot 5 = 10 \text{ м.}$$

Примем $N=18$

Уточним a : $a_{\phi} = \frac{L_n}{N} = \frac{172}{18} = 9,55$ м.

б) Согласно табл. 2.3 глубина слоя сезонных изменений в Республике Беларусь составляет 1,8 м. Так как толщина первого слоя земли по исходным данным равна 2 м, то определим приведенные расчетные сопротивления земли для расчетного сезона (см. раздел 2 формула 2.3):

$$\rho_{1n} = \frac{K_c \cdot \rho_1 \cdot h_1}{K_c \cdot h_1 - K_{c-1} \cdot h_c} = \frac{3 \cdot 120 \cdot 2}{3 \cdot 2 - 3 - 1 \cdot 1,8} = 300 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$\rho_{2n} = \rho_2 = 60 \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad h_{1n} = h_1 = 2 \text{ м,}$$

где $K_c=3$ – коэффициент сезонных изменений по табл. 2.3.

в) Определим величину сопротивления естественных заземлителей. На подстанции естественными заземлителями являются система «Трос-опора» двух ЛЭП 110 кВ. Их сопротивление по форме 4.6 равно:

$$R_{\text{ет-о}} = \frac{\sqrt{R_{\text{оп}} \cdot Z_T \cdot I_T \cdot 10^{-3}}}{n_{\text{ЛЭП}}} = \frac{\sqrt{15 \cdot 3 \cdot 250 \cdot 10^{-3}}}{2} = 1,68 \text{ Ом},$$

где $R_{\text{оп}} = 15 \text{ Ом}$ – среднее сопротивление заземления опор;

$Z_T = 3 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ – сопротивление грозозащитного троса ТК-50 (см.

табл. 4.6);

$l_T = 250 \text{ м}$ – средняя длина между опорами.

Кроме того ЗУ ОРУ–110 кВ подстанции соединено 4-мя связями с ЗУ ЗРУ–10 кВ. Сопротивление ЗУ установок 10 кВ при использовании его одновременно для установки собственных нужд подстанции напряжением 380/220 В по (4.2) не должно быть больше:

$$R_{\text{з10}} \leq \frac{125}{I_{\text{с10}}} \leq \frac{125}{15} = 8,34 \text{ Ом},$$

где $I_{\text{с10}} = 15 \text{ А}$ – емкостный ток замыкания на землю в сети 10 кВ.

Сопротивление заземляющего устройства нейтрали трансформатора собственных нужд на стороне 0,4 кВ не должно быть более 4 Ом [1]. Поэтому принимаем, что сопротивление заземляющего устройства ЗРУ–10 кВ должно быть не более 4 Ом.

Результирующее сопротивление естественных заземлителей:

$$R_{\text{рез.е}} = \frac{R_{\text{ет-о}} \cdot R_{\text{з10}}}{R_{\text{ет-о}} + R_{\text{з10}}} = \frac{1,68 \cdot 4}{1,68 + 4} = 1,18 \text{ Ом}.$$

г) Определим величину расчетного тока, стекающего с заземлителя при однофазном замыкании на землю в пределах подстанции (см. раздел 3):

$$I_3 \approx 0,3 - 0,6 \cdot I' = 0,6 \cdot 12,3 = 7,38 \text{ Ка}.$$

д) Вычислим требуемое сопротивление искусственного заземлителя ОРУ 110 кВ:

$$R_{\text{иск}} = \frac{R_{\text{е}} \cdot R_{\text{зН}}}{R_{\text{е}} - R_{\text{зН}}} = \frac{1,18 \cdot 0,5}{1,18 - 0,5} = 0,87 \text{ Ом},$$

где $R_{\text{зН}} = 0,5 \text{ Ом}$ – нормируемое значение сопротивления ЗУ.

3. Рассчитаем сопротивление стеканию тока с разработанного базового заземлителя:

$$R_3 = 0,433 \cdot \frac{\rho_{2n}}{\sqrt{S}} \left(\frac{\rho_{1n}}{\rho_{2n}} \right)^{\epsilon} + \frac{\rho_{1n}}{L_2 + N \cdot l_e} =$$

$$= 0,433 \cdot \frac{60}{42,9} \left(\frac{300}{60} \right)^{0,01} + \frac{300}{675 + 18 \cdot 19,8} = 0,862 \text{ Ом},$$

где $\epsilon = \frac{2 \cdot \eta_{II}}{\sqrt{S + N \cdot l_e}} = \frac{2 \cdot 2}{42,9 + 18 \cdot 19,8} = 0,01$;

$$l_e = l_1 + l_2 \frac{\rho_{1n}}{\rho_{2n}} = 2 - 0,7 + 5 - 1,3 \cdot \frac{300}{60} = 19,8;$$

l_1 и l_2 определяются по рис. 5.1.

Таким образом расчетное сопротивление R_3 меньше требуемого $R_{иск}$ и базовый заземлитель удовлетворяет требованиям ПУЭ.

4. Проверим горизонтальные заземлители и заземляющие оборудование проводники на термическую стойкость.

Термически стойкое сечение горизонтального заземлителя (см. раздел 4.5):

$$S_{Т.Г} = \frac{I \cdot \sqrt{t_k}}{140} = \frac{12300 \cdot \sqrt{0,12 + 0,06}}{140} = 37,3 \text{ мм}^2.$$

Принятые по коррозионной стойкости для выполнения горизонтальных заземлителей стальные прутки диаметром 12 мм имеют сечение 113 мм², т. е. удовлетворяют условию термической стойкости.

Заземляющие оборудование проводники исходя из коррозионной стойкости приняты из полосовой стали 30x4 мм². Они также удовлетворяют термической стойкости, поскольку расчетное термически стойкое сечение:

$$S_{Т.З} = \frac{I \cdot \sqrt{t_k}}{70} = \frac{12300 \cdot \sqrt{0,12 + 0,06}}{70} = 74,6 \text{ мм}^2.$$

Проверим напряжение на ЗУ: $U_3 = I_3 \cdot R_3 = 7,38 \cdot 0,5 = 3,69$ кВ, что ниже допустимого ($U_{3н} = 5,0$ кВ). Окончательный чертеж ЗУ ОРУ–110 кВ подстанции приведен на рис. 6.2.

5. Рассчитаем сопротивление ЗУ ЗРУ–10 кВ. Согласно ПУЭ величина сопротивления стеканию тока с заземлителя этого ЗРУ не должна превышать 4 Ом.

В качестве контурного заземлителя в ЗРУ–10 кВ используется электрически непрерывная арматура фундаментов здания. Протяженность этого заземлителя составляет 86,4 м. Площадь ЗУ равна $6,6 \cdot 36,6 = 242 \text{ м}^2$. Внутри контура заземляющая сетка выполнена из опорных швеллеров, заложенных в бетонный пол.

К контурному заземлителю здания присоединены ЗУ ОРУ–110 кВ и через экраны кабелей 10 кВ – ЗУ потребителей, тоже имеющие сопротивления стеканию тока не более 4 Ом. Сопротивление ЗУ потребителей не учитываем.

Рассчитаем сопротивление стеканию тока с контурного заземлителя здания:

$$R_3 = 0,866 \cdot \frac{\rho_{2н}}{\sqrt{S}} \left(\frac{\rho_{1н}}{\rho_{2н}} \right)^C + \frac{\rho_{1н}}{L_2} =$$

$$0,866 \cdot \frac{300}{15,5} \left(\frac{300}{60} \right)^{0,26} + \frac{300}{86,4} = 28,9 \text{ Ом},$$

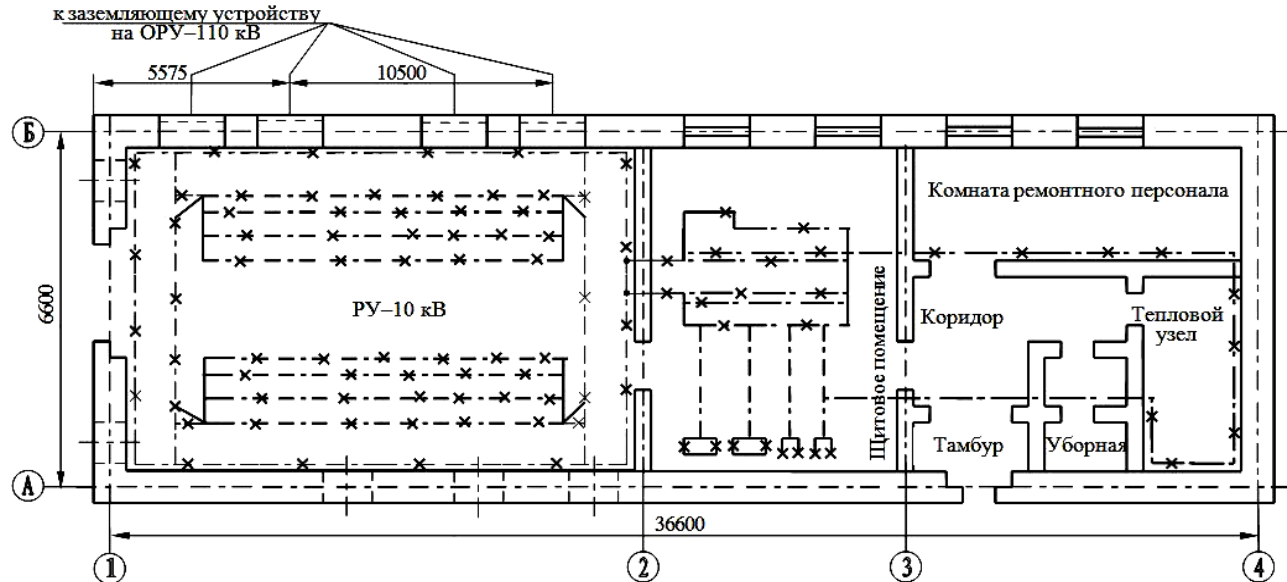
где $C = \frac{2\eta_{п}}{\sqrt{S}} = \frac{2 \cdot 2}{15,56} = 0,26$.

Результирующее сопротивление контурного заземлителя, сложенного параллельно с сопротивлением ЗУ ОРУ–110 кВ равно:

$$R_{3 \text{ рез}} = \frac{R_3 \cdot R_3 \text{ ОРУ}}{R_3 + R_3 \text{ ОРУ}} = \frac{28,9 \cdot 0,5}{28,9 + 0,5} = 0,49 \text{ Ом}.$$

Таким образом, сопротивление ЗУ закрытого распределительного устройства значительно ниже требуемого значения.

Чертеж ЗУ закрытого РУ–10 кВ выполнен на рис. 6.3.



1. Один из опорных швеллеров каждого шкафа КРУ присоединить сваркой не менее, чем в двух местах к швеллеру закладному, который используется в качестве заземляющего проводника. Все опорные швеллеры крайних шкафов КРУ присоединить сваркой к швеллерам закладным.
2. Заземление панелей в щитовом помещении осуществить приваркой их к швеллерам закладным.
3. Прочее электрооборудование присоединить к магистрали заземления полосовой сталью сваркой внахлестку.
4. Заземляющее устройство выполнить в соответствии с инструкцией по устройству сетей заземления.

Рис. 6.3. ЗУ РУ-10 кВ и щитового помещения ПС 110/10 кВ

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – Минск : Дизайн ПРО, 2007. – 720 с.
2. Методические указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 35–750 кВ. – Минск : стандарт ГПО «Белэнерго», 2007. – 75 с.
3. Маньков, В. Д. Защитное заземление и защитное зануление электроустановок : справочник / В. Д. Маньков, С. Ф. Заграничный. – СПб. : Политехника, 2005. – 400 с.
4. Бургсдорф, В. В. Заземляющие устройства электроустановок / В. В. Бургсдорф, А. И. Якобс. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
5. Электрическая часть станций и подстанций : учебник для вузов / А. А. Васильев [и др.] ; – 2-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Расчет напряжения прикосновения для заземляющей сетки без вертикальных заземлителей.

Напряжение прикосновения для расположенной в двухслойной земле заземляющей сетки без вертикальных заземлителей определяется по выражению П1 [3]:

$$U_{np} = D \cdot \frac{I_3 \cdot \rho_{экв}}{\sqrt{S}}, \quad (\text{П1})$$

где $D = \left(0,22 \cdot I_q \cdot \frac{0,88 \cdot \sqrt{S}}{\sqrt{d \cdot t}} \right) \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{S}} \right)^{0,6}$;

d – эквивалентный диаметр горизонтальных заземлителей (для полосы с шириной равной диаметру принимается равным 0,5 с), м;

t – глубина заложения сетки, м;

v – ширина ячейки заземляющей сетки, м;

c – ширина полосы, м;

$\rho_{экв}$ – эквивалентное удельное сопротивление земли для расчета наибольшего напряжения прикосновения для заземляющей сетки без вертикальных заземлителей определяемое по данным табл. П1.

Таблица П1

Относительное эквивалентное сопротивление земли
 $\rho_{экв} / \rho_{2n}$ для расчета напряжения прикосновения заземляющей
 сетки, расположенной в двухслойной земле и не имеющей
 вертикальных заземлителей

ρ_{1n} / ρ_{2n}	L_2 / \sqrt{S}	$\rho_{экв} / \rho_{2n}$ при $h_{1n} - t / \sqrt{S}$ (h_{1n} – толщина первого слоя)							
		0,00625	0,0125	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,125	4	0,32	0,25	0,18	0,15	0,13	0,13	0,125	0,125
0,125	6	0,32	0,26	0,20	0,17	0,15	0,14	0,13	0,125
0,125	10	0,32	0,27	0,22	0,20	0,17	0,15	0,135	0,125
0,125	18	0,32	0,28	0,24	0,21	0,19	0,16	0,14	0,125

Окончание табл. П1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,25	4	0,48	0,39	0,33	0,30	0,26	0,25	0,25	0,25
0,25	6	0,48	0,41	0,35	0,32	0,28	0,27	0,25	0,25
0,25	10	0,48	0,42	0,37	0,34	0,30	0,28	0,26	0,25
0,25	18	0,48	0,43	0,37	0,36	0,33	0,30	0,27	0,25
0,5	4	0,7	0,65	0,58	0,55	0,52	0,51	0,50	0,50
0,5	6	0,7	0,64	0,60	0,57	0,54	0,53	0,51	0,50
0,5	10	0,7	0,655	0,61	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50
0,5	18	0,7	0,66	0,63	0,6	0,58	0,55	0,53	0,50
2,0	4	1,60	1,65	1,75	1,85	1,95	2,00	2,00	2,00
2,0	6	1,55	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,00	2,00
2,0	10	1,55	1,60	1,70	1,77	1,85	1,90	2,00	2,00
2,0	18	1,55	1,60	1,70	1,77	1,85	1,90	2,00	2,00
4,0	4	2,60	2,90	3,30	3,60	3,85	3,90	4,00	4,00
4,0	6	2,50	2,80	3,20	3,40	3,65	3,80	4,00	4,00
4,0	10	2,40	2,70	3,10	3,30	3,50	3,70	3,90	4,00
4,0	18	2,40	2,60	3,00	3,20	3,40	3,60	3,80	4,00
8,0	4	4,30	5,00	5,80	6,30	7,70	7,30	8,00	8,00
8,0	6	4,00	4,70	5,40	6,20	7,30	7,60	7,90	8,00
8,0	10	3,80	4,50	5,20	5,80	6,90	7,40	7,80	8,00
8,0	18	3,60	4,20	5,00	5,40	6,30	7,00	7,70	8,00

Учебное издание

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ОРУ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ**

Методические указания
по курсовому и дипломному проектированию
для студентов энергетических специальностей

Составитель
МАЗУРКЕВИЧ Владимир Николаевич

Технический редактор *О. В. Песенько*

Подписано в печать 28.08.2012. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 2,54. Тираж 100. Заказ 403.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный
технический университет

Кафедра «Электрические станции»

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ОРУ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ**

*Методические указания
по курсовому и дипломному проектированию*

Минск
БНТУ
2012