

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра электроснабжения

**В.Г. Басманов**

## **ЗАЗЕМЛЕНИЕ И МОЛНИЕЗАЩИТА**

**Часть 1**

**Заземление**

Специальность 140211 «Электроснабжение»,  
III, IV курс д/о, IV, V курс з/о  
Дисциплины «Изоляция и перенапряжение»,  
«Системы электроснабжения»,  
Специальность 140610 «Электрооборудование  
и электрохозяйство предприятий, организаций  
и учреждений», III, IV курс д/о  
Дисциплины «Высоковольтная изоляция»,  
«Потребители электрической энергии»  
Специальность 140205  
«Электроэнергетические системы и сети», IV  
курс д/о  
Дисциплина «Техника высоких напряжений»

Киров 2009

Басманов В.Г. Заземление и молниезащита.: Учеб. пособие для вузов в двух частях. Часть 1 Заземление – Киров: Изд-во ВятГУ, 2009. – 155 с.

В учебном пособии рассматриваются вопросы, связанные с заземлением и молниезащитой. В этой части рассматриваются вопросы, связанные с заземлением электроустановок, приводятся требования по выполнению заземляющих устройств электроустановок разных классов напряжений, рассматриваются методы расчета, даны примеры расчета.

Учебное пособие предназначено для студентов дневного, заочного отделения, обучающихся по специальностям 140211 «Электроснабжение», 140610 «Электрооборудование и электрохозяйства предприятий, организаций, учреждений», 140205 «Электроэнергетические системы и сети». Рекомендуется при изучении дисциплин: «Изоляция и перенапряжение», «Техника высоких напряжений (ТВН)», «Высоковольтная изоляция», «Системы электроснабжения», «Потребители электрической энергии».

Авторская редакция

Подписано в печать

Усл.печ.л. 9,69

Бумага офсетная

Печать копир Aficio 1022

Заказ

Тираж 100.

Бесплатно

Текст напечатан с оригинал-макета, предоставленного автором.

610000, г Киров, ул. Московская, 36.

Оформление обложки, изготовление – ПРИП ВятГУ.

© Вятский государственный университет, 2009.

© В.Г. Басманов, 2009.

## ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения электробезопасности согласно [8] требуется выполнять заземление или зануление электроустановок:

1) при номинальном напряжении более 50 В переменного тока (действующее значение) или более 120 В постоянного (выпрямленного) тока - во всех электроустановках;

2) при номинальных напряжениях выше 25 В переменного тока (действующее значение) или выше 60 В выпрямленного тока - только в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных электроустановках.

Заземление или зануление электроустановок не требуется при номинальных напряжениях до 25 В переменного тока или до 60 В выпрямленного тока во всех случаях, кроме взрывоопасных зон и электросварочных установок.

Защита от прямого прикосновения с помощью ограждений или оболочек, или изоляции не требуется, если электрооборудование находится в зоне действия системы уравнивания потенциалов и номинальное напряжение не превышает:

- 25 В переменного тока или 60 В выпрямленного тока при условии, что оборудование нормально эксплуатируется только в сухих помещениях и мала вероятность контакта человека с частями, могущими оказаться под напряжением;

- 6 В переменного тока или 15 В выпрямленного тока во всех остальных случаях.

Численные значения нормативов по [1, 8] даны в таблице В1. Сравнение сопоставимых нормативов [1] и стандартов МЭК позволяет сделать вывод о необходимости существенного ужесточения требований к защитным мерам. В частности, в помещениях без повышенной опасности согласно стандарту [8] требуется выполнять заземление или зануление при номинальном напряжении в 7,6 раз меньшем, чем установлено требованиями [1].

В разработанную и утвержденную в 2002 году новую редакцию главы 1.7. «Заземление и защитные меры электробезопасности» [2] внесены изменения, учитывающие рекомендации [8].

Таблица В.1

Нормативный документ	Требования	Помещения		
		Без повышенной опасности	с повышенной опасностью	особо опасные
ПУЭ - 6 изд.	Требуется выполнять заземление или зануление	При номинальном напряжении 380 В и выше переменного или 440 В и выше постоянного тока	При номинальном напряжении выше 42 В переменного или выше 110 В постоянного тока	
	Не требуется выполнять заземление или зануление	При номинальном напряжении ниже 380 В переменного или ниже 440 В постоянного тока	При номинальном напряжении до 42 В переменного или до 110 В постоянного тока во всех случаях, кроме взрывоопасных зон и электросварочных установок	
Рекомендации МЭК 364-4-41 (1992)	Требуется выполнять заземление или зануление	При номинальном напряжении более 50 В переменного или более 120 В постоянного тока	При номинальном напряжении выше 25 В переменного или выше 60 В выпрямленного тока	
	Не требуется выполнять заземление или зануление	При номинальном напряжении 50 В и ниже переменного или 120 В и ниже постоянного тока	При номинальном напряжении до 25 В переменного или до 60 В выпрямленного тока во всех случаях, кроме взрывоопасных зон и электросварочных установок	
	Не требуется защита от прямого прикосновения с помощью ограждений или оболочек, или изоляции, если электрооборудование находится в зоне действия системы уравнивания потенциалов	При номинальном напряжении, не превышающем 25 В переменного или 60 В выпрямленного тока	При номинальном напряжении, не превышающем 6 В переменного или 15 В выпрямленного тока	
	Не требуется защита от прямого прикосновения к сторонним проводящим частям, которые могут оказаться под напряжением	При напряжении, не превышающем 25 В переменного или 60 В выпрямленного тока	При напряжении, не превышающем 6 В переменного или 15 В выпрямленного тока	

# **ГЛАВА 1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, ТЕРМИНОЛОГИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

## **§1.1. Область применения, терминология, классификация**

Нормы распространяются на все вновь сооружаемые и реконструируемые электроустановки переменного и постоянного тока напряжением до 1 кВ и выше и содержат требования к их заземлению и защите людей от поражения электрическим током при прямом прикосновении к опасным токоведущим частям, а также при повреждении изоляции, в соответствии с [1], [2], комплексом стандартов ГОСТ Р 50571 [6 - 15] и другими нормативно-техническими документами [3 - 5].

В целях большей чёткости всё дальнейшее изложение построено на основе использования терминологии, принятой в [1], [2]. В необходимых случаях термины и их определения (табл. 1.1) уточнены и дополнены в соответствии с современными представлениями.

В основу классификации электроустановок по мерам электробезопасности положено номинальное напряжение электроустановки (до 1 кВ и выше 1 кВ) и режим её нейтрали (табл. 1.2).

В основу классификации помещений и территорий по опасности электропоражения положены условия, создающие повышенную опасность: сырость, токопроводящая пыль, химически активная среда, токопроводящие полы, высокая температура, возможность одновременного прикосновения человека к металлическим корпусам электрооборудования и к заземлённым частям (табл. 1.3).

Таблица 1.1

Термин	Определение
1	2
Электроустановка (ЭУ)	Совокупность машин, аппаратов, линий, заземляющих и защитных устройств, а также вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенных для безопасного производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электрической энергии и преобразования ее в другой вид энергии. Электроустановки по условиям электробезопасности разделяются на электроустановки до 1 кВ и электроустановки выше 1 кВ (по действующему значению напряжения)
Открытая или наружная электроустановка	Электроустановка, не защищенная зданием от атмосферных воздействий. Электроустановка, защищенная только навесами, сетчатыми ограждениями и т.п., рассматривается как наружная
Закрытая или внутренняя электроустановка	Электроустановка, размещенная внутри здания, защищающего ее от атмосферных воздействий
Заземляющее устройство	Совокупность заземлителя и заземляющих проводников
Заземлитель	Проводник (электрод) или совокупность электрически соединенных между собой проводников (электродов), находящихся в соприкосновении с землей или ее эквивалентом
Искусственный заземлитель	Заземлитель, специально выполняемый для целей заземления
Естественный заземлитель	Находящиеся в соприкосновении с землей или с ее эквивалентом электропроводящие части коммуникаций, зданий и сооружений производственного или иного назначения, используемые для целей заземления
Заземляющий проводник	Проводник, соединяющий заземляемые части с заземлителем
Заземленная нейтраль	Нейтраль трансформатора или генератора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление (например, через трансформаторы тока)
Коэффициент замыкания на землю в трехфазной электрической сети	Отношение разности потенциалов между неповрежденной фазой и землей в точке замыкания на землю другой или двух других фаз к разности потенциалов между фазой и землей в этой точке до замыкания
Электрическая сеть с эффективно заземленной нейтралью	Трехфазная электрическая сеть выше 1 кВ, в которой коэффициент замыкания на землю не превышает 1,4

Продолжение табл. 1.1

1	2
Изолированная нейтраль	Нейтраль трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через приборы сигнализации, измерения, защиты, заземляющие дугогасящие реакторы и подобные им устройства, имеющие большое сопротивление
Заземление какой-либо части электроустановки или другой установки	Преднамеренное электрическое соединение этой части с заземляющим устройством
Защитное заземление	Заземление частей электроустановки с целью обеспечения электробезопасности
Зануление в электроустановках напряжением до 1 кВ	Преднамеренное электрическое соединение открытых проводящих частей (ОПЧ) с заземленной нейтралью источника трехфазного тока посредством PEN-проводника (система TN-C) или PE-проводника (система TN-S), с заземленным выводом источника однофазного тока - посредством PE-проводника (система TN-S)
Уравнивающий проводник	Защитный проводник (PE-проводник), применяемый с целью уравнивания потенциалов
Защитный проводник (PE-проводник)	Проводник, применяемый для выполнения защитных мер от поражения электрическим током в случае повреждения и для соединения открытых проводящих частей: - с другими открытыми проводящими частями; - со сторонними проводящими частями; - с заземлителем, заземляющим проводником или заземленной токоведущей частью
Нулевой защитный проводник (PE-проводник) в электроустановках напряжением до 1 кВ	Проводник в системе TN-S, соединяющий открытые проводящие части (ОПЧ) с заземленной нейтралью источника трехфазного тока, с заземленным выводом источника однофазного тока, с заземленной средней точкой источника в сетях постоянного тока (система TN)
Магистраль заземления, уравнивания или зануления	Заземляющий, уравнивающий или нулевой защитный проводник с двумя или более ответвлениями
Рабочее заземление	Заземление какой-либо точки токоведущих частей электроустановки, необходимое для обеспечения работы электроустановки
Нулевой рабочий проводник (N-проводник) в электроустановках до 1 кВ	Проводник в системе TN-S, используемый для питания электроприемников, соединенный с заземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с заземленным выводом источника однофазного тока, с заземленной средней точкой источника в трехпроводных сетях постоянного тока

1	2
PEN-проводник	Проводник в трехфазной системе TN-C, который присоединен к заземленной нейтрали источника и одновременно выполняет функции нулевого защитного проводника (PE) и нулевого рабочего проводника (N)
Сопротивление заземляющего устройства	Отношение напряжения на заземляющем устройстве к току, стекающему с заземлителя в землю
Эквивалентное удельное сопротивление земли с неоднородной структурой	Такое удельное сопротивление земли с однородной структурой, в которой сопротивление заземляющего устройства имеет то же значение, что и в земле с неоднородной структурой Термин «удельное сопротивление», применяемый в Нормах для земли с неоднородной структурой, следует понимать как «эквивалентное удельное сопротивление»
Зона растекания	Область земли, в пределах которой возникает заметный градиент потенциала при стекании тока с заземлителя
Зона нулевого потенциала	Зона земли за пределами зоны растекания
Напряжение на заземляющем устройстве	Напряжение, возникающее при стекании тока с заземлителя в землю между точкой ввода тока в заземляющее устройство и зоной нулевого потенциала
Напряжение шага	Напряжение между двумя точками земли, обусловленное растеканием тока замыкания на землю, при одновременном касании их ногами человека
Напряжение относительно земли при замыкании на корпус	Напряжение между этим корпусом и зоной нулевого потенциала
Выравнивание потенциала	Снижение разности потенциалов между заземляющим устройством и поверхностью земли путем электрического соединения его с уложенными в земле защитными проводниками. Выравнивание потенциала предназначено для предотвращения появления опасных напряжений прикосновения и шага на территории электроустановки при повреждении изоляции, а также при нормальных и вынужденных режимах, не сопровождающихся повреждением основной изоляции в электроустановках, использующих землю в качестве цепи обратного тока, например, в электроустановках электрифицированных железных дорог
Уравнивание потенциалов	Снижение разности потенциалов между доступными одновременно прикосновению открытыми проводящими частями (ОПЧ), сторонними проводящими частями (СПЧ), заземляющими и защитными проводниками (PE), а также PEN-проводниками, путем электрического соединения этих частей между собой

1	2
Дополнительная защита	Применение мер для исключения или смягчения электрического удара в случае повреждения основной защиты и/или защиты при повреждении изоляции
Удар молнии в землю	Электрический разряд атмосферного происхождения между грозовым облаком и землей, состоящий из одного или нескольких импульсов тока
Точка поражения	Точка, в которой молния соприкасается с землей, зданием или устройством молниезащиты. Удар молнии может иметь несколько точек поражения
Защищаемый объект	Здание или сооружение, их часть или пространство, для которых выполнена молниезащита, отвечающая требованиям настоящего норматива
Устройство молниезащиты	Система, позволяющая защитить здание или сооружение от воздействий молнии. Она включает в себя внешние и внутренние устройства. В частных случаях молниезащита может содержать только внешние или только внутренние устройства
Устройства защиты от прямых ударов молнии (молниеотводы)	Комплекс, состоящий из молниеприемников, токоотводов и заземлителей
Устройства защиты от вторичных воздействий молнии	Устройства, ограничивающие воздействия электрического и магнитного полей молнии
Молниеприемник	Часть молниеотвода, предназначенная для перехвата молний
Токоотвод (спуск)	Часть молниеотвода, предназначенная для отвода тока молнии от молниеприемника к заземлителю
Устройство защиты от перенапряжений	Устройство, предназначенное для ограничения перенапряжений между элементами защищаемого объекта (например, разрядник, нелинейный ограничитель перенапряжений или иное защитное устройство)
Отдельно стоящий молниеотвод	Молниеотвод, молниеприемники и токоотводы которого расположены таким образом, чтобы путь тока молнии не имел контакта с защищаемым объектом
Молниеотвод, установленный на защищаемом объекте	Молниеотвод, молниеприемники и токоотводы которого расположены таким образом, что часть тока молнии может растекаться через защищаемый объект или его заземлитель
Зона защиты молниеотвода	Пространство в окрестности молниеотвода заданной геометрии, отличающееся тем, что вероятность удара молнии в объект, целиком размещенный в его объеме, не превышает заданной величины
Допустимая вероятность прорыва молнии	Предельно допустимая вероятность $P$ удара молнии в объект, защищаемый молниеотводами

Таблица 1.2

## Классификация электроустановок по мерам электробезопасности

Номинальное напряжение электроустановки, кВ	Режим нейтрали	Классификация электроустановок
До 1 кВ	Заземленная нейтраль	Электроустановка до 1 кВ с заземленной нейтралью
Выше 1 кВ	Изолированная нейтраль	Электроустановка до 1 кВ с изолированной нейтралью
	Эффективно заземленная нейтраль	Электроустановка выше 1 кВ в сетях с эффективно заземленной нейтралью
	Изолированная нейтраль	Электроустановка выше 1 кВ с изолированной нейтралью

Таблица 1.3

## Классификация помещений и территорий по опасности электропоражения

Помещение, территория	Условия, создающие опасность
1. Помещение без повышенной опасности	Отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность (см. пп. 2 и 3)
2. Помещение с повышенной опасностью	Наличие в нем одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: а) сырости или токопроводящей пыли (см. табл. 1.1); б) токопроводящих полов (металлических, земляных, железобетонных, кирпичных и т.п.); в) высокой температуры (см. табл. 1.1); г) возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлическим или железобетонным конструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой
3. Особо опасное помещение	Наличие одного из следующих условий, создающих особую опасность: а) особой сырости (см. табл. 1.1); б) химически активной или органической среды (см. табл. 1.1); в) одновременно двух или более условий повышенной опасности (см. п. 2)
4. Территория размещения наружных ЭУ	По опасности поражения людей электрическим током эта территория приравнивается к особо опасному помещению

## §1.2. Системы заземления электроустановок

Системы электроснабжения классифицируются Международной электротехнической комиссией (МЭК) в зависимости от способа заземления распределительной сети и примененных мер защиты от поражения электрическим током. Распределительные сети подразделяются на сети с заземленной нейтралью и сети с изолированной нейтралью. Стандарт МЭК-364 подразделяет распределительные сети в зависимости от конфигурации токоведущих проводников, включая нулевой рабочий (нейтральный) проводник, и типов систем заземления. При этом используются следующие обозначения. Первая буква, I или T, характеризует связь с землей токоведущих проводников (заземление сети). Вторая буква, T или N, характеризует связь с землей открытых проводящих частей (ОПЧ) и сторонних проводящих частей (СПЧ) (заземление оборудования и СПЧ).

*Первая буква (I или T).* Первая буква I означает, что все токоведущие части изолированы от земли или что одна точка сети связана с землей через сопротивление, или - через разрядник, или - воздушный промежуток. Сети с изолированной нейтралью (I) могут быть: (1) весьма малыми сетями, такими как сети безопасного сверхнизкого напряжения (БСНН или SELV) с электрическим отделением с помощью безопасных разделяющих трансформаторов, или (2) средними по размеру - такими, которые используются для питания отдельных цехов промышленных предприятий.

Использование системы IT ограничивается специальным применением в тех производствах, где перерыв электроснабжения может быть опасен.

Первая буква T указывает на прямую связь, по меньшей мере одной точки сети, с землей (terra). Например, питаемая от вторичной обмотки трансформатора, соединенной в звезду, трехфазная распределительная сеть с нейтральным проводником, напряжением 127/220 В или 220/380 В с нейтралью, соединенной с землей через заземляющее устройство.

*Вторая буква (T или N).* Вторая буква означает тип соединения между ОПЧ, защитным заземляющим проводником (заземление оборудования) электроустановки и землей. Вторая буква T означает прямое соединение между ОПЧ и СПЧ и землей (terra), независимое от системного заземления, которое может содержать или не содержать токоведущие части системы. Вторая буква N означает прямое соединение ОПЧ и СПЧ с заземленной точкой (точками) сети посредством PEN- или PE-проводника.

Таблица 1.4

Сетевое (рабочее) и защитное заземление

Обозначение	Сетевое (рабочее) заземление	Защитное заземление проводящих частей
<b>IT</b>	Непосредственное соединение с землей отсутствует. Допускается соединение с землей через сопротивление, воздушный промежуток, разрядник и т.д.	Непосредственное соединение с землей, независимое от сетевого заземления
<b>TT</b>	Соединение с землей в одной или нескольких точках распределительной сети за пределами сети потребителя	Непосредственное соединение с землей, независимое от сетевого заземления
<b>TN</b>	Соединение с землей в одной или нескольких точках распределительной сети и в одной или более точках в сети потребителя	Соединение с «сетевой землей» с помощью PE- или PEN-проводника
<b>TI</b>	Соединение с землей в одной или нескольких точках распределительной сети за пределами сети потребителя	Отсутствуют соединения с землей и с сетевым заземлением

Токоведущие части сети соединяются с землей для ограничения напряжения, которое может появиться на них в результате прямого удара молнии (п.у.м.) или вторичных проявлений молнии (индуцированные волны перенапряжений), или в результате непреднамеренного контакта с линиями более высокого напряжения, или в результате пробоя изоляции токоведущих частей распределительной сети.

Причины, по которым не соединяют токоведущие части распределительной сети с землей, следующие: во избежание перерыва питания потребителя при единственном повреждении (пробой изоляции на землю токоведущих частей распределительной сети); во избежание искрообразования во взрыво- и пожароопасных зонах при единственном повреждении изоляции токоведущих частей сети. Заземление электрооборудования, а точнее - заземление открытых проводящих частей (ОПЧ), является одной из многочисленных мер, которые могут быть использованы для защиты от поражения электрическим током. Заземление ОПЧ предполагает создание эквипотенциальной среды, что снижает вероятность появления напряжения на теле человека. В системе TN заземление ОПЧ обеспечивает создание для тока замыкания цепи с низким сопротивлением. Это облегчает работу устройств защиты от сверхтока.

Обозначения TN, TT и IT относятся только к конфигурации распределительных сетей. Эти обозначения имеют ограниченное отношение к различным методам, которые могут быть использованы для обеспечения защиты от поражения электрическим током, включая заземление ОПЧ. Хотя каждая система обеспечивается посредством соединения ОПЧ с землей, эффективный метод, используемый в установке для защиты от поражения электрическим током, может включать другие меры защиты.

На рис. 1.1. - 1.5. даны системы трёхфазных сетей. Принятые на рисунках обозначения имеют следующий смысл. Первая буква:

T - непосредственное присоединение одной точки токоведущих частей источника питания к земле,

I - все токоведущие части изолированы от земли, или одна точка заземлена через сопротивление.

Вторая буква - характер заземления открытых проводящих частей (ОПЧ) электроустановки:

T - непосредственная связь ОПЧ с землёй, независимо от характера связи источника питания с землёй,

N - непосредственная связь ОПЧ с точкой заземления источника питания (в системах переменного тока обычно заземляется нейтралью).

Последующие буквы (если таковые имеются) - устройство нулевого рабочего и нулевого защитного проводника:

S - функция нулевого защитного и нулевого рабочего проводника обеспечивается отдельными проводниками;

C - функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников объединены в одном проводнике (PEN-проводник).

*Система TN.* Питающие сети системы TN имеют непосредственно присоединенную к земле точку. Открытые проводящие части электроустановки присоединяются к этой точке посредством нулевых защитных проводников.

В зависимости от устройства нулевого рабочего и нулевого защитного проводников различают следующие три типа системы TN:

система TN-S - нулевой рабочий и нулевой защитный проводники работают отдельно по всей системе;

система TN-C-S - функции нулевого рабочего и нулевого защитного проводников объединены в одном проводнике в части сети;

система TN-C - функции нулевого рабочего и нулевого защитного проводников объединены в одном проводнике по всей сети.

*Система TT.* Питающая сеть системы TT имеет точку, непосредственно связанную с землей, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к заземлителю, электрически независимому от заземлителя нейтрали источника питания.

*Система IT.* Питающая сеть системы IT не имеет непосредственной связи токоведущих частей с землей, а открытые проводящие части электроустановки заземлены.

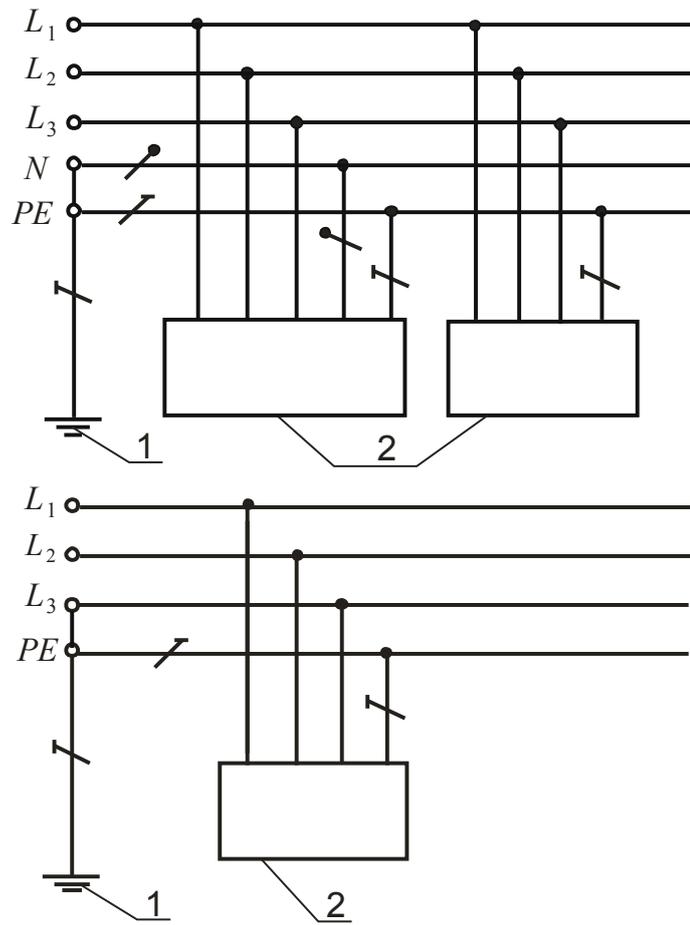


Рис. 1.1. Система TN-S (нулевой рабочий и нулевой защитный проводники работают раздельно)

1 - заземлитель источника питания; 2 - открытые проводящие части

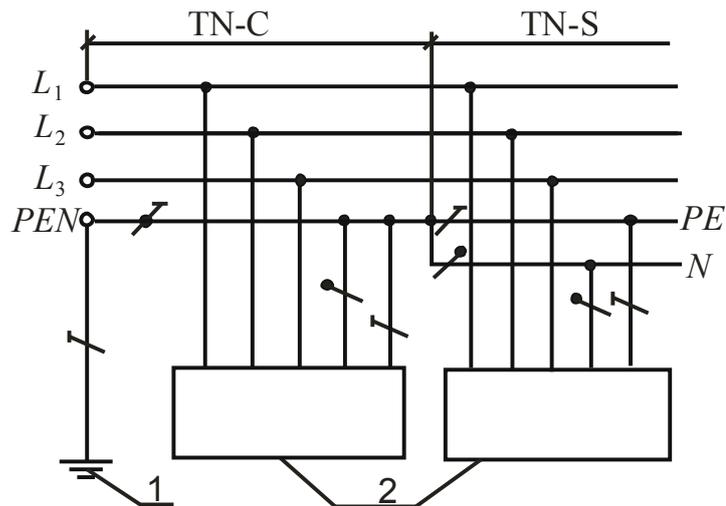


Рис. 1.2. Система TN-C-S (в части сети нулевой рабочий и нулевой защитный проводники объединены)

1 - заземлитель источника питания; 2 - открытые проводящие части

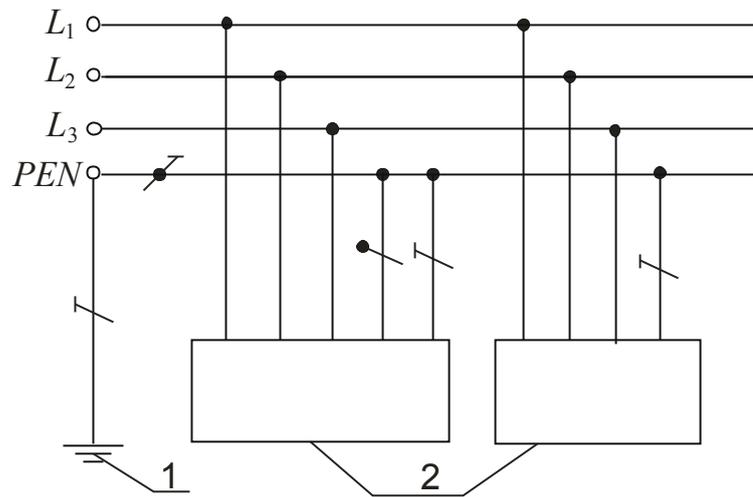


Рис. 1.3. Система TN-C (нулевой рабочий и нулевой защитный проводники объединены по всей сети)

1 - заземлитель источника питания; 2 - открытые проводящие части

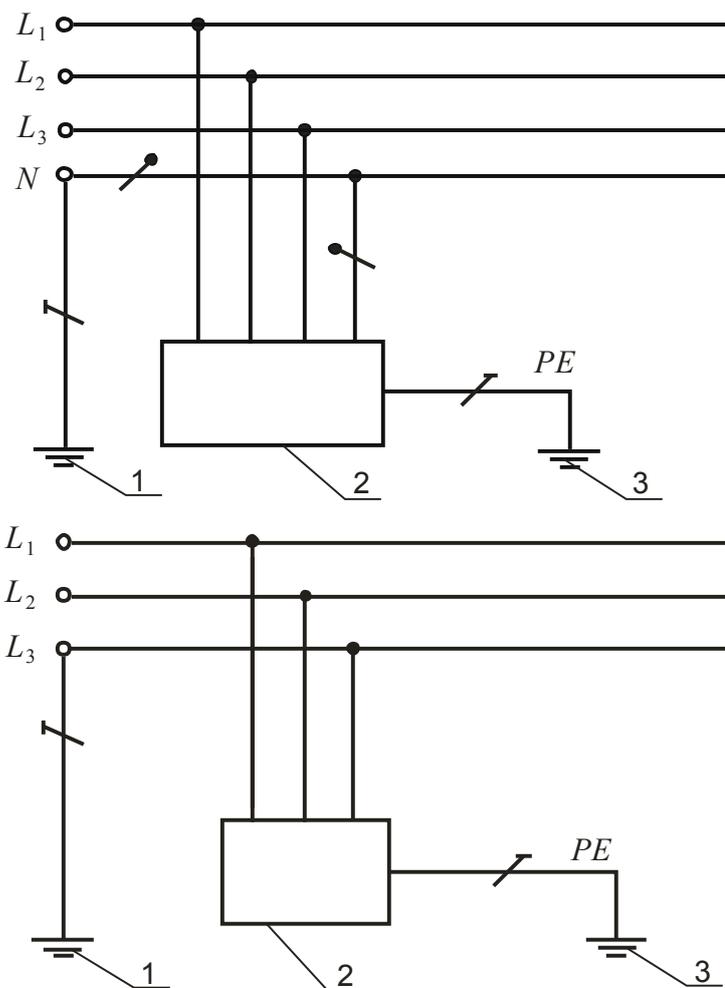


Рис. 1.4. Система TT

1 - заземлитель источника питания; 2 - открытые проводящие части;  
3 - заземлитель корпусов оборудования

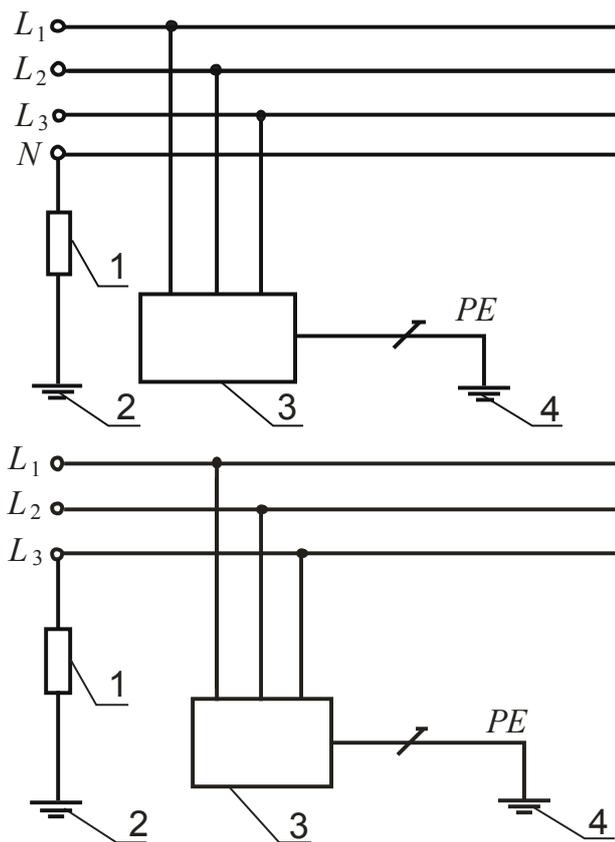


Рис. 1.5. Система IT

1 - сопротивление; 2 - заземлитель источника питания; 3 - открытые проводящие части; 4 - заземлитель корпусов оборудования

## **ГЛАВА 2. ТРЕБОВАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК РАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

### **§2.1. Электроустановки напряжением выше 1 кВ сети с эффективно заземленной нейтралью**

1. Заземляющее устройство электроустановки напряжением выше 1 кВ сети с эффективно заземлённой нейтралью следует выполнять с соблюдением требований либо к напряжению прикосновения, либо с соблюдением требований к его сопротивлению и к конструктивному выполнению. Как в том, так и в другом случае должно быть соблюдено требование ограничения напряжения на заземляющем устройстве. Требования по величине сопротивления заземляющего устройства не более 0,5 Ом не распространяются на заземляющие устройства опор ВЛ.

Для рабочего и защитного заземлений выполняется единое заземляющее устройство.

2. Напряжение на заземляющем устройстве при стекании с него расчётного тока замыкания на землю не должно превышать 10 кВ. При напряжении на заземляющем устройстве более 5 кВ должны быть предусмотрены меры по защите изоляции отходящих кабелей связи и телемеханики и по предотвращению выноса опасных потенциалов за пределы электроустановки.

3. Заземляющее устройство, выполняемое с соблюдением требований к его сопротивлению, должно иметь в любое время года сопротивление не более 0,5 Ом с учётом естественных заземлителей.

4. В целях выравнивания электрического потенциала и обеспечения присоединения электрооборудования к заземляющему устройству на территории, занятой оборудованием, следует прокладывать продольные и поперечные горизонтальные заземлители и соединять их между собой в заземляющую сетку.

Продольные заземлители должны быть проложены вдоль осей электрооборудования со стороны обслуживания на глубине 0,5 - 0,7 м от поверхности земли и на расстоянии 0,8 - 1 м от фундаментов или оснований оборудования. Допускается увеличение расстояний от фундаментов или оснований оборудования до 1,5 м с прокладкой одного заземлителя для двух рядов оборудования, если стороны обслуживания обращены одна к другой, а расстояние между фундаментами или основаниями двух рядов не превышает 3,0 м.

Поперечные заземлители следует прокладывать в удобных местах между оборудованием на глубине 0,5 - 0,7 м от поверхности земли. Расстояние между ними рекомендуется принимать увеличивающимся от периферии к центру заземляющей сетки. При этом первое и последующие расстояния, начиная от периферии, не должны превышать соответственно 4,0; 5,0; 6,0; 7,5; 9,0; 11,0; 13,5; 16,0; и 20,0 м.

Размеры ячеек заземляющей сетки, примыкающих к местам присоединения нейтралей силовых трансформаторов, короткозамыкателей, компенсирующих аппаратов и т.п. к заземляющему устройству, не должны превышать  $6 \times 6 \text{ м}^2$ .

Горизонтальные заземлители следует прокладывать по краю территории, занимаемой заземляющим устройством так, чтобы они в совокупности образовывали замкнутый контур.

Глубина укладки горизонтальных заземлителей на территории ОРУ должна быть не менее 0,5 м, за территорией электроустановки - не менее 1 м.

В скальных породах допускается прокладывать заземлители на меньшей глубине, но не менее 0,15 м.

Вертикальные заземлители, применяемые для снижения сопротивления заземляющего устройства, рекомендуется устанавливать по его внешнему периметру.

Если контур заземляющего устройства располагается в пределах внешнего ограждения, то у входов и въездов на её территории следует

выравнивать потенциал путём установки двух вертикальных заземлителей у внешнего горизонтального заземлителя напротив входов и въездов. Вертикальные заземлители должны быть длиной 3 - 5 м, а расстояние между ними должно быть равно ширине входа или въезда.

5. Заземляющее устройство, выполняемое с соблюдением требований, предъявляемых к напряжению прикосновения, должно обеспечивать в любое время года при стекании с него тока замыкания на землю значений напряжения прикосновения, не превышающих нормированных (табл. 2.1.). Сопротивление заземляющего устройства при этом определяется по допустимому напряжению на заземляющем устройстве и току замыкания на землю.

6. При определении значения допустимого напряжения прикосновения (табл. 2.1) в качестве расчетного времени воздействия следует принимать сумму 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.

Таблица 2.1

Нормированные значения напряжения прикосновения и токов, проходящих через человека, для электроустановок напряжением выше 1 кВ частотой 50 Гц с эффективно заземленной нейтралью

Нормируемая величина	Продолжительность воздействия тока t, с											
	0,01 - 0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1 - 5
$I$ , мА	650	500	400	325	250	200	160	130	110	105	100	50/t
$U_{пр. макс}$ , В	650	500	400	325	250	200	160	130	110	105	100	50/t

7. Размещение продольных и поперечных горизонтальных гасителей должно определяться требованиями ограничения напряжений прикосновения до нормированных значений и удобством присоединения заземляющего оборудования. Расстояние между продольными и поперечными

горизонтальными искусственными заземлителями не должно превышать 30 м, а глубина их заложения в грунт должна быть не менее 0,3 м. У рабочих мест допускается прокладка заземлителей на меньшей глубине, если необходимость этого подтверждается расчётом, а само выполнение не снижает удобства обслуживания электроустановки и срока службы заземлителя. Для снижения напряжения прикосновения у рабочих мест в обоснованных случаях может быть выполнена подсыпка щебня толщиной 0,1 - 0,2 м.

8. Дополнительные требования к конструктивному выполнению заземляющего устройства. При выполнении заземляющего устройства с соблюдением требований, предъявляемых к его сопротивлению или к напряжению прикосновения табл. 2.1., дополнительно к требованиям пп 3. или 5 следует:

- заземляющие проводники, присоединяющие оборудование или конструкции к заземлителю, в земле прокладывают на глубине не менее 0,3 м;
- вблизи мест расположения заземляемых нейтралей силовых трансформаторов, короткозамыкателей, компенсирующих аппаратов и т.п. прокладывают продольные и поперечные горизонтальные заземлители, которые должны обеспечивать распределение тока не менее чем в двух направлениях.

При выходе заземляющего устройства за пределы ограждения электроустановки горизонтальные заземлители, находящиеся вне территории электроустановки, следует прокладывать на глубине не менее 1 м. Внешний контур заземляющего устройства в этом случае рекомендуется выполнять в виде многоугольника с тупыми или скруглёнными углами.

9. Внешнюю ограду электроустановки не рекомендуется присоединять к заземляющему устройству, если последнее не выходит за пределы ограды.

Когда ограждение не присоединено к заземляющему устройству, расстояние от элементов ограды до элементов заземляющего устройства должно быть не менее 2 м. Если от электроустановки отходят воздушные линии электропередачи напряжением ПО кВ и выше, то металлическую или железобетонную ограду следует заземлять с помощью вертикальных

заземлителей длиной 2 - 3 м, установленных по периметру ограды через 20 - 50 м. Установка таких заземлителей не требуется для ограды с металлическими стойками или стойками из железобетона, арматура которых электрически соединена с металлическими частями ограды.

Внешнюю ограду электроустановки рекомендуется присоединить к заземляющему устройству в случаях, когда последнее выходит за пределы ограждения. Во всех случаях напряжение прикосновения к ограждению не должно превышать допустимых значений. С этой целью рекомендуется с внешней стороны ограждения на расстоянии 1 м от него и на глубине 0,5 м проложить замкнутый горизонтальный заземлитель, связанный с заземляющим устройством не менее чем с четырёх сторон. С этой же целью и таким же образом прокладывается замкнутый горизонтальный заземлитель вокруг зданий, расположенных вне контура заземляющего устройства и имеющего металлическую связь с этим контуром. При наличии асфальтовых отмосток замкнутый заземлитель не обязателен.

Внутреннее ограждение электроустановки следует присоединять к заземляющему устройству. Внутреннее ограждение подсоединяется к внешнему только в случае присоединения последнего к заземляющему устройству. Изоляция внешнего ограждения от внутреннего должна выполняться так же, как внешнего от зданий и сооружений.

Не следует устанавливать на внешней ограде электроприёмники напряжением до 1 кВ, питаемые непосредственно от понизительных трансформаторов, расположенных на территории электроустановки. При размещении электроприёмников на внешней ограде их питание следует осуществлять через безопасные разделяющие трансформаторы. Эти трансформаторы не допускается устанавливать на ограде. Линия, соединяющая вторичную обмотку безопасного разделяющего трансформатора с электроприёмником, расположенным на ограде, должна быть изолирована от земли на расчётное значение напряжения на заземляющем устройстве.

Выходящие за пределы ограды горизонтальные заземлители, трубопроводы, кабели с металлическими защитными покровами и другие металлические коммуникации должны быть проложены посередине между стойками ограды на глубине не менее 0,5 м.

10. Выравнивание потенциалов вокруг производственных зданий. Если заземляющее устройство промышленной или другой электроустановки соединено с заземлителем электроустановки выше 1 кВ с эффективно заземлённой нейтралью кабелем с металлической оболочкой или броней или посредством других металлических связей, то для выравнивания потенциалов вокруг такой электроустановки или вокруг здания, в котором она размещена, необходимо соблюдение одного из следующих условий:

а) Укладка в землю на глубине 1 м и на расстоянии 1 м от фундамента здания или от периметра территории, занимаемой оборудованием, заземлителя, соединённого с металлическими конструкциями строительного и производственного назначения и сетью заземления (зануления), а у входов и въездов в здание - укладка проводников на расстоянии 1 и 2 м от заземлителя на глубине 1 и 1,5 м соответственно и соединение этих проводников с заземлителем;

б) Использование железобетонных фундаментов в качестве заземлителей, если при этом обеспечивается допустимый уровень выравнивания потенциалов. Обеспечение условий выравнивания потенциалов с помощью железобетонных фундаментов, используемых в качестве заземлителей, определяется на основе требований пп. 5, 6.

Не требуется выполнение условий, указанных в пп. а и б, если вокруг здания имеются асфальтовые отмостки, в том числе у входов и въездов. Если у какого-либо входа (въезда) отмостка отсутствует, у этого входа (въезда) должно быть выполнено выравнивание потенциалов путём укладки двух проводников, как указано в п. а, или соблюдено условие по п. б. При этом во всех случаях должны выполняться требования 11.

11. Во избежание выноса потенциала не допускается:

- питание электроприёмников, находящихся за пределами заземляющих устройств электроустановок выше 1 кВ сети с эффективно заземлённой нейтралью, от обмоток до 1 кВ с заземлённой нейтралью трансформаторов, находящихся в пределах контура заземляющего устройства;

- питание электроприёмников от трансформаторов с изолированной нейтралью, если эти трансформаторы заземляются на заземляющее устройство, на котором возможно возникновение потенциала, превышающего напряжение срабатывания пробивного предохранителя, а электроприёмники располагаются за пределами заземляющего устройства.

При необходимости питания таких электроприёмников, на территории, занимаемой такими электроприёмниками, должно быть выполнено выравнивание потенциалов. См. также 10.

## **§2.2. Электроустановки напряжением выше 1 кВ сети с изолированной нейтралью**

1. Заземляющее устройство электроустановки напряжением выше 1 кВ сети с изолированной нейтралью следует выполнять с соблюдением требований либо к напряжению (см. 2, 4, 6), либо с соблюдением требований к его сопротивлению и к конструктивному выполнению (см. 3, 8).

Как в том, так и в другом случае должно быть соблюдено требование ограничения напряжения на заземляющем устройстве. Требования не распространяются на заземляющие устройства опор ВЛ.

2. Напряжение на заземляющем устройстве при стекании с него расчётного тока замыкания на землю (п. 7) не должно превышать:

- при использовании заземляющего устройства только для электроустановок выше 1 кВ - 250 В;

- при использовании заземляющего устройства одновременно для электроустановки до 1 кВ - 125 В.

3. Заземляющее устройство, выполняемое с соблюдением требований к его сопротивлению, должно иметь в любое время года сопротивление не более 10 Ом с учётом естественных заземлителей.

4. Заземляющее устройство, выполняемое с соблюдением требований, предъявляемых к напряжению прикосновения, должно обеспечивать в любое время года при стекании с него тока замыкания на землю значений напряжения прикосновения, не превышающих нормированных (см. табл. 2.2). При этом сопротивление заземляющего устройства определяется по допустимому напряжению на заземляющем устройстве и расчётному току замыкания на землю (п. 7).

5. В электроустановках выше 1 кВ с изолированной нейтралью в дополнение к заземлению должны быть предусмотрены устройства для быстрого отыскания замыканий на землю. Защита от замыканий на землю должна устанавливаться с действием на отключение (по всей электрически связанной сети) в тех случаях, в которых это необходимо по условиям безопасности (для линий, питающих передвижные подстанции и механизмы, торфяные разработки и т.п.).

6. Время действия защиты. Напряжения прикосновения (табл. 2.2) рекомендуется определять для времени его воздействия при наличии защиты, действующей на отключение, как суммы времени действия основной защиты и полного времени отключения выключателя. При отсутствии такой защиты время воздействия следует принимать выше 1 сек.

7. При определении напряжения на заземляющем устройстве и напряжения прикосновения в качестве расчётного тока следует принимать:

а) в сетях без компенсации ёмкостных токов - полный ток замыкания на землю;

б) в сетях с компенсацией ёмкостных токов:

- для заземляющих устройств, к которым присоединены компенсирующие аппараты, - ток, равный 125 % номинального тока этих аппаратов;

- для заземляющих устройств, к которым не присоединены компенсирующие аппараты, - остаточный ток замыкания на землю, проходящий в данной сети при отключении наиболее мощного из компенсирующих аппаратов или наиболее разветвлённого участка сети.

Таблица 2.2

Нормированные значения напряжения прикосновения и токов, проходящих через человека, для электроустановок напряжением до 1 кВ с заземленной и изолированной нейтралью и выше 1 кВ с изолированной нейтралью

Род тока	Нормируемая величина	Продолжительность воздействия тока $t$ , с											
		0,01 - 0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1 - 5
Переменный ток, 50 Гц	$I$ , мА	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	6
	$U$ , В	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
Переменный ток, 400 Гц	$I$ , мА	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	8
	$U$ , В	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	36
Постоянный ток	$I$ , мА	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15
	$U$ , В	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
Выпрямленный двухполупериод- ный ток	$I$ , мА	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	-
	$U$ , В	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	-
Выпрямленный однополупериод- ный ток	$I$ , мА	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	-
	$U$ , В	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	-

В качестве расчётного тока может быть принят ток срабатывания релейной защиты от однофазных замыканий на землю или междуфазных замыканий, если в последнем случае защита обеспечивает отключение замыканий на землю. При этом ток замыкания на землю должен быть не менее полуторакратного тока срабатывания релейной защиты или трёхкратного номинального тока предохранителей.

Расчётный ток замыкания на землю должен быть определён для той из возможных в эксплуатации схем сети, при которой этот ток имеет наибольшее значение.

8. В случаях, когда заземляющее устройство выполняется с соблюдением требований к его сопротивлению, в целях выравнивания потенциала в открытых электроустановках вокруг площади занимаемой электрооборудованием, на расстоянии 0,8 - 1 м от фундаментов или оснований электрооборудования на глубине 0,5 м должен быть проложен замкнутый горизонтальный заземлитель («контур»), к которому подсоединяется заземляемое оборудование.

Если сопротивление заземляющего устройства выше 10 Ом (для земли с удельным сопротивлением более 500 Ом·м), то следует дополнительно проложить горизонтальные заземлители вдоль рядов оборудования со стороны обслуживания на глубине 0,5 м и на расстоянии 0,8 - 1 м от фундаментов или оснований оборудования.

При установке оборудования на опорах ВЛ горизонтальный заземлитель должен быть проложен со стороны обслуживания на расстоянии 0,8 - 1 м от фундамента на глубине 0,5 м и присоединён к заземлителю опоры.

9. На ВЛ напряжением 3 - 35 кВ должны быть заземлены:

- а) опоры, имеющие грозозащитный трос или другие устройства защиты;
- б) железобетонные и металлические опоры;
- в) опоры, на которых установлены силовые или измерительные трансформаторы, разъединители, предохранители или другие аппараты.

10. Значения сопротивления заземляющих устройств опор должны обеспечиваться применением искусственных заземлителей, а естественная проводимость фундаментов, подземных частей опор и пасынков (приставок) при расчетах не должна учитываться.

11. Горизонтальные заземлители ВЛ, как правило, должны находиться на глубине не менее 0,5 м.

В случае установки опор в скальных грунтах допускается кладка лучевых заземлителей непосредственно под разборным слоем над скальными породами при толщине слоя не менее 0,1 м. При меньшей толщине этого слоя или в случае отсутствия рекомендуется прокладка заземлителей по поверхности скалы с заливкой их цементным раствором.

12. Железобетонные фундаменты опор, не ограничивающих полет пересечения, могут быть использованы в качестве естественных заземлителей при осуществлении металлической связи между анкерными болтами и арматурой фундамента.

Наличие битумной обмазки на железобетонных опорах и фундаментах, используемых в качестве естественных заземлителей, не должно учитываться.

13. Для заземления железобетонных опор в качестве заземляющих проводников следует использовать все те элементы ненапряженной продольной арматуры стоек, которые металлически соединены между собой и могут быть присоединены к заземлителю.

14. Тросы и детали крепления изоляторов к траверсе железобетонных опор должны быть металлически соединены с заземляющим спуском или заземленной арматурой.

15. Каждый из заземляющих проводников опор ВЛ должен иметь сечение  $50 \text{ мм}^2$  при стальных многопроволочных проводниках и диаметр не менее 10 мм при стальных оцинкованных одно-проволочных проводниках.

### **§2.3. Электроустановки напряжением до 1 кВ сети с заземленной нейтралью (система TN)**

1. Нейтраль генератора, трансформатора на стороне до 1 кВ должна быть присоединена к заземляющему устройству при помощи специального искусственного заземляющего проводника (РЕ-проводника). Сечение заземляющего проводника должно быть не менее указанного в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Наименьшие размеры заземлителей и заземляющих проводников,  
проложенных в земле

Материал	Профиль сечения	Диаметр, мм	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Толщина стенки, мм	
Сталь черная	Круглый:				
	для вертикальных заземлителей;	16	-	-	
	для горизонтальных заземлителей	10	-	-	
	Прямоугольный	-	100	4	
	Угловой	-	100	4	
Сталь оцинкованная	Трубный	32	-	3,5	
	Круглый:				
	для вертикальных заземлителей;	12	-	-	
	для горизонтальных заземлителей	10	-	-	
	Прямоугольный	-	75	3	
	Трубный	25	-	2	
	Медь	Круглый	12	-	-
		Прямоугольный	-	50	2
Трубный		20	-	2	
	Канат многопроволочный	1,8*	35	-	

\* Диаметр каждой проволоки.

Использование нулевого рабочего проводника (N-проводника), идущего от нейтрали генератора или трансформатора на щит распределительного устройства, в качестве заземляющего проводника не допускается.

В качестве указанного заземляющего устройства рекомендуется в первую очередь использовать железобетонные фундаменты производственных зданий и сооружений. В этом случае нейтраль трансформатора следует заземлять путём присоединения к металлической или железобетонной колонне здания или сооружения.

При отсутствии возможности использовать железобетонные фундаменты производственных зданий и сооружений должно быть сооружено искусственное заземляющее устройство в непосредственной близости от генератора или трансформатора.

2. Все доступные прикосновению открытые проводящие части электроустановок должны быть присоединены к заземленной нейтральной точке источника питания посредством защитных проводников. Если нейтральной точки нет или она недоступна, должен быть заземлен фазный проводник. Запрещается использовать фазный проводник в качестве PEN-проводника.

а) Если существуют другие точки связи с землей, рекомендуется защитные проводники также присоединять к этим точкам (повторное заземление).

б) В больших зданиях, таких как высотные, повторное заземление защитных проводников практически невозможно. В этом случае аналогичную функцию выполняет система уравнивания потенциалов.

в) По той же причине рекомендуется заземление защитных проводников на вводе в здания и в помещения.

3. В стационарных электроустановках трехфазного тока функцию защитного и нулевого рабочего провода можно совместить в одном проводнике (PEN-проводнике) при условии выполнения следующих требований:

- если его сечение не менее  $10 \text{ мм}^2$  по меди или  $16 \text{ мм}^2$  по алюминию и рассматриваемая часть электроустановки не защищена устройствами защитного отключения, реагирующими на дифференциальные токи;

- если, начиная с какой-либо точки установки, нулевой рабочий и нулевой защитный проводники разделены, запрещается объединять их за этой точкой. В точке разделения необходимо предусмотреть отдельные зажимы или шины нулевого рабочего и нулевого защитного проводников. PEN-проводник, совмещающий функции рабочего и защитного, должен подключаться к зажиму, предназначенному для защитного проводника.

4. Сторонние проводящие части не могут быть использованы в качестве единственного PEN-проводника.

5. В цепи PEN-проводника допускается устанавливать выключатели, которые одновременно с отключением PEN-проводника отключают все находящиеся под напряжением проводники.

6. Допускается использование PEN-проводников осветительных линий для зануления электрооборудования, питающегося по другим линиям, если все указанные линии питаются от одного трансформатора, их проводимость удовлетворяет требованиям настоящей главы и исключена возможность отсоединения PEN-проводников во время работы других линий. В таких случаях не должны применяться выключатели, отключающие PEN-проводники вместе с фазными.

7. В местах, где неизолированные PE- и PEN-проводники могут образовывать электрические пары или возможно повреждение изоляции фазных проводников в результате искрения между неизолированными PE- или PEN-проводником и открытыми проводящими частями (ОПЧ) или сторонними проводящими частями (СПЧ), например, при прокладке проводов в трубах, коробах, лотках, PE- и PEN-проводники должны иметь изоляцию, равноценную изоляции фазных проводников.

8. Не допускается использование PEN-проводников в цепях питания электроприёмников однофазного тока. Для питания таких электроприёмников в качестве нулевого рабочего проводника (N-проводника) должен быть использован отдельный третий проводник, присоединённый к PEN-проводнику в ответвительной коробке, низковольтном комплектном устройстве.

9. В системах TN могут использоваться:

- устройства защиты от сверхтока;
- устройства защиты, реагирующие на дифференциальный ток.

10. В системе TN-C не должны применяться устройства защиты, реагирующие на дифференциальный ток.

11. Когда устройство защиты, реагирующее на дифференциальный ток, применяют для автоматического отключения в системе TN-C-S, PEN-проводник не должен использоваться на стороне нагрузки. Присоединение

защитного проводника к PEN-проводнику должно осуществляться на стороне источника питания по отношению к устройству защиты, реагирующему на дифференциальный ток.

Во взрывоопасных зонах любого класса в электроустановках до 1 кВ с заземленной нейтралью должна применяться система TN-S с селективной системой защит, реагирующих на дифференциальные токи. При этом проводящие свойства открытых проводящих частей (ОПЧ) и сторонних проводящих частей (СПЧ) при определении параметров цепи «фаза-нуль» учету не подлежат. Проводящие свойства ОПЧ и СПЧ могут быть учтены при определении необходимого сечения уравнивающих проводников. Собственное сечение преднамеренно проложенных уравнивающих проводников должно быть не менее  $6 \text{ мм}^2$  (по меди).

12. Когда устройство защиты, реагирующее на дифференциальный ток, используют для автоматического отключения цепи вне зоны действия основной системы уравнивания потенциалов, открытые проводящие части не должны быть связаны с сетью системы TN, но защитные проводники должны присоединяться к заземлителю, имеющему сопротивление, обеспечивающее срабатывание этого устройства.

Вне зоны действия основной системы уравнивания потенциалов могут использоваться другие защитные меры:

- питание через безопасный разделяющий трансформатор;
- применение дополнительной изоляции.

13. Характеристики устройств защиты и полное сопротивление цепи «фаза-нуль» (в случае, когда сопротивлением в месте замыкания можно пренебречь) должны обеспечивать при замыкании на открытые проводящие части автоматическое отключение питания в пределах нормированного времени. Это требование выполняется при соблюдении следующего условия

$$Z_S I_a \leq U_0, \quad (2.1)$$

где:  $Z_S$  - полное сопротивление цепи «фаза-нуль»;

$I_a$  - ток, меньший тока замыкания, вызывающий срабатывание устройства защиты за время, являющееся функцией номинального напряжения  $U_0$ , согласно табл. 2.4;

$U_0$  - номинальное напряжение (действующее значение) между фазой и землёй.

Предельно допустимые времена отключения, указанные в табл. 2.4, обеспечивают электробезопасность цепей, питающих передвижное или переносное электрооборудование класса I посредством штепсельных розеток или без них.

Таблица 2.4

Предельно допустимые времена отключения для системы TN

$U_0, В$	Время отключения, с
120	0,8
220	0,4
380	0,2
500	0,1

14. Для распределительных цепей время отключения не должно превышать 5 с.

Время отключения, превышающее время, требуемое в табл. 2.4, но не более 5 с, допускается для распределительной цепи, питающей стационарное электрооборудование, только при условии выполнения одного из следующих требований:

а) полное сопротивление защитного проводника между распределительным щитом и точкой присоединения защитного проводника к основной системе уравнивания потенциалов не превышает

$$\frac{50}{U_0} Z_s, \text{ Ом} \quad (2.2)$$

где 50 – падение напряжения на участке защитного проводника между главной заземляющей шиной и распределительным щитом или щитком, В;

б) имеется уравнивающая связь распределительного щита с основной системой уравнивания потенциалов, т.е. к шине РЕ распределительного щита

или щитка присоединена дополнительная система уравнивания потенциалов, охватывающая те же сторонние проводящие части, что и основная система уравнивания потенциалов.

15. В качестве PEN-проводника между нейтралью и щитом распределительного устройства следует использовать: при выводе фаз шинами - шину на изоляторах, при выводе фаз кабелем (проводом) - жилу кабеля (провода).

Проводимость PEN-проводника, идущего от нейтрали генератора или трансформатора, должна быть не менее 50 % проводимости вывода фаз.

Изоляция PEN-проводников должна быть равноценна изоляции фаз, за исключением тех случаев, когда в качестве PEN-проводников используются алюминиевые оболочки кабелей, оболочки и опорные конструкции шинопроводов, а также открытые проводящие части (ОПЧ) и сторонние проводящие части (СПЧ).

16. Если при использовании устройств защиты от сверхтока формулированные условия (см. табл. 2.4) не выполняются, должно применяться дополнительное уравнивание потенциалов. В качестве альтернативы уравниванию потенциалов для защиты может использоваться устройство защитного отключения, реагирующее на дифференциальный ток.

17. В случаях замыкания фазного проводника на землю, для того, чтобы потенциал защитного проводника и связанных с ним открытых проводящих частей не превышал установленного значения 25 В, должно выполняться следующее соотношение:

$$\frac{R_b}{R_E} \leq \frac{25}{U_0 - 25}, \quad (2.3)$$

где  $R_b$  - эквивалентное сопротивление всех заземлителей, соединённых параллельно;

$R_E$  - минимальное сопротивление заземлителя сторонних проводящих частей, не присоединённых к защитному проводнику и оказавшихся в цепи замыкания фазы на землю;

$U_0$  - номинальное действующее значение фазного напряжения.

При этом сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединены нейтрали генератора или трансформатора или выводы источника однофазного тока, в любое время года должно быть не более 2, 4 и 8 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника трёхфазного тока или 380, 220 и 127 В источника однофазного тока. Это сопротивление должно быть обеспечено с учётом использования естественных заземлителей, а также заземлителей повторных заземлений PEN-проводника ВЛ до 1 кВ при количестве отходящих линий не менее двух. При этом сопротивление заземлителя, расположенного в непосредственной близости от нейтрали генератора или трансформатора или вывода источника однофазного тока, должно быть не более 15, 30 и 60 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника трёхфазного тока или 380, 220 и 127 В источника однофазного тока.

При удельном сопротивлении горной породы более 100 Ом·м допускается увеличивать указанные нормы в 0,01с раз, но не более чем в десять раз.

18. На ВЛ зануление должно быть осуществлено PEN-проводником, проложенным на тех же опорах, что и фазные провода.

На концах ВЛ (или ответвлений от них) длиной более 200 м, а также на вводах от ВЛ к электроустановкам, которые подлежат занулению, должны быть выполнены повторные заземления PEN-проводника. При этом в первую очередь следует использовать естественный заземлитель, например подземные части опор, а также заземляющие устройства, выполненные для защиты от грозových перенапряжений.

Повторные заземления PEN-проводника в сетях постоянного тока должны быть осуществлены при помощи отдельных искусственных заземлителей, которые не должны иметь металлических соединений с подземными трубопроводами. Заземляющие устройства на ВЛ постоянного тока, выполненные для защиты от грозových перенапряжений, рекомендуется использовать для повторного заземления PEN-проводника.

Заземляющие проводники для повторных заземлений PEN-проводника должны быть выбраны из условия длительного прохождения тока не менее 25 А. По механической прочности эти проводники должны иметь размеры не менее приведённых в табл. 2.3.

19. Общее сопротивление растеканию заземлителей (в том числе естественных) всех повторных заземлений PEN-проводника каждой ВЛ в любое время года должно быть не более 5, 10 и 20 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника трёхфазного тока или 380, 220 и 127 В источника однофазного тока. При этом сопротивление растеканию заземлителя каждого из повторных заземлений должно быть не более 15, 30 и 60 Ом соответственно при тех же напряжениях.

При удельном сопротивлении земли с более 100 Ом·м допускается увеличивать указанные нормы в 0,01с раз, но не более чем в десять раз.

20. Крюки и штыри фазных проводов, установленных на железобетонных опорах, а также арматура этих опор, должны быть присоединены к PEN-проводнику. Стальные оцинкованные однопроводные заземляющие проводники должны иметь диаметр не менее 8 мм. Крюки и штыри фазных проводов, установленные на деревянных опорах, где выполнено повторное заземление PEN-проводника, подлежат заземлению.

21. Изоляция электрооборудования электроустановки потребителя должна выдерживать перенапряжения, вызываемые повреждением на высокой стороне, обрывом нулевого рабочего провода (PEN- или N-проводника), а также коротким замыканием фазного провода на PEN- или N-проводник, что выполняется при условии ограничения предельно допустимого значения перенапряжения в электрооборудовании электроустановки потребителя следующими значениями:

$$U_{\phi} + 250 \text{ В при } t > 5 \text{ с};$$

$$U_{\phi} + 1200 \text{ В при } t \leq 5 \text{ с}.$$

## ГЛАВА 3. ЗАЗЕМЛИТЕЛИ

### §3.1. Удельное сопротивление земли

Электрические характеристики заземлителей зависят от следующих факторов: а) структуры земли, в которой заземлитель находится, ее свойства и состояния; б) вида элементов, из которых заземлитель выполнен (стержни, угловая сталь, трубы, полосы), их размеров, количества и взаимного расположения.

Электрофизические свойства земли характеризуются величиной ее удельного сопротивления. За эту величину принимается сопротивление между сторонами куба земли с ребрами в 1 м. Оно равно, Ом·м<sup>2</sup>/м или Ом·м:

$$\rho = \frac{r \cdot F}{l}, \quad (3.1)$$

где  $r$  - сопротивление, Ом, некоторого объема земли сечением  $F$ , м<sup>2</sup>, длиной  $l$ , м.

Участки земли, на которых расположен заземлитель, могут состоять из одного, двух или нескольких горизонтальных слоев. Удельное сопротивление разных слоев земли и вместе с ним сопротивление находящихся в них заземлителей существенно зависят от характера и строения слоев, содержания влаги и растворимых веществ (электролитов), от температуры. Последняя в верхних слоях земли изменяется в разное время года, а влажность зависит от числа выпавших осадков и подвержена также значительным колебаниям. Поэтому сопротивление заземлителей, расположенных близко от поверхности земли, например, полос, металлических оболочек кабелей, имеет значительные колебания в течение года. Меньшему влиянию подвержены вертикальные заземлители в виде стержней, труб, угловой стали, погружаемых в землю на глубину 3 – 5 м и более. Наибольшее сопротивление имеют заземлители в зимнее время при промерзании земли или в засушливое – при ее высыхании.

Расчеты заземлителей должны быть основаны на предварительных измерениях удельных сопротивлений земли в месте их устройства. Если принять какие-либо средние величины (например, 100 Ом·м), то в результате может оказаться, что на устройство заземлителя затрачены излишние средства, либо, наоборот, может оказаться необходимым уже после сооружения установки выполнить добавочные работы по его расширению.

В расчетах сложных заземлителей должна также учитываться неоднородность земли. Это дает возможность использовать для их устройства слои с меньшим удельным сопротивлением, а также определить более точно сопротивление растеканию заземлителя в целом, что позволяет найти оптимальное технико-экономическое решение.

Для практических целей без особой погрешности в расчетах принимают условно, что земля состоит из двух, а не многих слоев, в пределах которых удельное сопротивление постоянно (в действительности резкой границы между слоями нет). Двухслойная модель отражает также изменение удельного сопротивления вследствие промерзания и высыхания даже при однородной земле. Она характеризуется тремя параметрами: удельным сопротивлением верхнего слоя  $\rho_1$  нижнего  $\rho_2$  и толщиной слоев – верхнего  $h_1$  и нижнего  $h_2$ , причем принимается  $h_2 = \infty$ .

При производстве предварительных расчетов, если измерение удельного сопротивления земли еще не произведено, приходится пользоваться приближенными значениями (табл.3.1). Разумеется, такого рода расчеты могут рассматриваться только как ориентировочные.

Промерзание или высыхание земли учитывается соответствующими сезонными повышающими коэффициентами. В табл. 3.2 приведены значения этих коэффициентов для вертикальных и горизонтальных электродов в разных климатических зонах. Данные относятся к нормальной влажности земли. Более точные данные можно получить, учитывая состояние земли во время измерений соответствующими повышающими или понижающими коэффициентами к измеренной величине удельного сопротивления земли.

Таблица 3.1

Приближенные значения удельных сопротивлений земли и воды  $\rho$ , Ом·м

Род земли и воды	Значения
Песок	400—1000 и более
Супесок	150—400 и более
Суглинок	40—150 и более
Глина	8—70 и более
Садовая земля	40
Чернозем	10—50 и более
Торф	20
Каменистая глина (приблизительно 50 %)	100
Мергель, известняк, крупнозернистый песок с валунами	1000—2000
Скала, валуны	2000—4000
Речная вода (на равнинах)	10—80
Морская вода	0,2
Водопроводная вода	5—60

Таблица 3.2

Признаки климатических зон и значения сезонного коэффициента  $k_c$

Данные, характеризующие климатические зоны и тип применяемых электродов	Климатические зоны России			
	1	2	3	4
1. Климатические признаки зон: Средняя многолетняя низшая температура (январь), °С	От - 20 До -15	От -14 До -10	От -10 До 0	От 0 До +5
Средняя многолетняя высшая температура (июль), °С	От +16 До +18	От +18 До +22	От +22 До +24	От +24 До +26
Среднегодовое количество осадков, см	40	50	50	30-50
Продолжительность замерзания вод, дни	190-170	150	100	0
2. Значение коэффициента $k_c$ : - при применении стержневых электродов длиной 2-3 м и при глубине заложения их вершины 0,5-0,8 м	1,8-2,0	1,5-1,8	1,4-1,6	1,2-1,4
- то же при длине электродов 5 м	1,35	1,25	1,15	1,1
- при применении протяженных горизонтальных электродов при глубине заложения 0,7 - 0,8 м	4,5-7,0	3,5-4,5	2,0-2,5	1,5-2,0

Особые трудности вызывает устройство заземлителей в песчаной и каменистой земле, в условиях вечной мерзлоты, а также в пустынных областях, где земля значительное время года находится в сухом состоянии.

Следует избегать размещения заземлителей в местах, где возможна пропитка земли маслами, нефтью и т. п., а также вблизи трубопроводов горячей воды, пара и других сооружений, вызывающих ее высыхание. В указанных случаях сопротивление заземлителей резко возрастает.

Так, если в сухой песок с удельным сопротивлением 2200 Ом·м добавить 3% (по объему) нефти, его сопротивление возрастает более чем в 3 раза, при добавке 10% – более чем в 3000 раз (нефть имеет удельное сопротивление порядка  $10^9 - 10^{16}$  Ом·м). Не следует также размещать заземлители в местах, где возможна коррозия их из-за химических воздействий, либо нужно применять в этих случаях специальные меры защиты от коррозии.

### **§3.2. Искусственные заземлители**

Под искусственными заземлителями понимаются закладываемые в землю металлические электроды, специально предназначенные для осуществления связи с землей.

Материалом для заземлителей служит в основном черная или оцинкованная сталь. Опыт применения заземлителей из меди, помимо удорожания, дал в ряде зарубежных стран отрицательные результаты. Медные заземлители образуют гальванические пары с находящимися в земле стальными конструкциями, оболочками кабелей и другими металлическими частями, по отношению к которым медь является катодом, в результате чего происходит коррозия подземных стальных частей – анодов по отношению к меди.

Заземляющие электроды из угловой стали, стержней и труб (вертикальные) наиболее распространены, что объясняется следующими преимуществами: а) возможность проникнуть в углубленные слои земли, что

обеспечивает благоприятные условия для работы заземлителя в отношении температуры и влажности; б) достаточная механическая прочность, позволяющая механизировать их погружение в землю.

Увеличение диаметра или толщины электрода не дает существенного уменьшения сопротивления растеканию. Увеличение длины трубы, например с 1 до 3 м при диаметре 5 см, приводит к уменьшению сопротивления растеканию почти в 2,5 раза (и более, если учесть, что при увеличении длины трубы уменьшается влияние промерзания земли). Наиболее употребительна длина вертикальных электродов 2,5 – 5 м. В последнее время с развитием механизации погружения электродов находят наиболее широкое применение электроды из стержней диаметром 12 – 14 мм, длиной 5 м и большей длины. Это позволяет преодолеть трудности, связанные с большим удельным сопротивлением верхних слоев земли.

Угловая сталь и тем более трубы как более дорогие изделия и менее приспособленные для механизированного погружения на значительную глубину применяются все реже. Для того чтобы уменьшить колебания величин сопротивления заземлителей, связанных с изменениями температуры, они располагаются ниже уровня земли не менее чем на 0,5 – 0,8 м.

Сопротивление одного вертикального электрода, нижний конец которого находится ниже уровня земли, может быть рассчитано по формуле:

$$r_B = \frac{0,366 \rho}{l} \left( \lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t + l}{4t - l} \right), \quad \text{Ом}, \quad (3.2)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление земли, Ом·м;

$l$  – длина электрода, м;

$d$  – внешний диаметр электрода, м;

$t$  – глубина заложения, равная расстоянию от поверхности земли до середины электрода, м.

Рассчитанное, например, по формуле (3.2) сопротивление погруженного в землю стержня диаметром 12 мм, длиной 5 м и при  $t=0,7+2,5=3,2$  м будет равно (при однородной земле):

$$r_B = 0,288\rho, \text{ Ом.}$$

В ориентировочных расчетах сопротивление вертикального электрода в однородной земле можно принимать равным:

$$r_B \approx \frac{\rho}{l}, \text{ Ом.} \quad (3.3)$$

Сопротивление вертикального электрода, находящегося в двухслойной земле (или в однородной, но с учетом промерзания или высыхания верхнего слоя), определяется по формуле

$$r_{B.д} = \frac{0,366 \left( \lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right)}{\Delta l_1 / \rho_1 + \Delta l_2 / \rho_2}, \quad (3.4)$$

где  $\rho_1, \rho_2$  – удельные сопротивления соответственно верхнего или нижнего слоев земли, Ом·м;

$\Delta l_1, \Delta l_2$  – части длины электрода, находящиеся соответственно в верхнем или нижнем слое земли, м; остальные обозначения – по формуле (3.2).

При вертикальных электродах из угловой стали, ее эквивалентный диаметр  $d_y$  следует определять, исходя из активной поверхности растекания тока, по равенству

$$d_y = 0,95b, \quad (3.5)$$

где  $b$  – ширина сторон уголка.

Для временных заземлителей и измерений применяется забивка в землю вертикальных электродов, верхний конец которых остается над поверхностью земли. Сопротивление такого электрода рассчитывается по формуле

$$r_B = \frac{0,366\rho}{l} \lg \frac{4l}{d}, \text{ Ом,} \quad (3.6)$$

где  $l$  – длина части электрода, находящаяся в земле, м;

$d$  – внешний диаметр, м.

Горизонтально расположенные электроды из полос или круглой стали применяются для связи вертикальных электродов и как самостоятельные заземлители. Ширина полосы или диаметр круглой стали лишь незначительно

вливают на сопротивление растеканию (в расчетные формулы эти параметры входят под знаком логарифма), в основном сопротивление растеканию горизонтальных электродов зависит от их длины.

Рациональная глубина погружения полосовых заземлителей во избежание большого объема земляных работ – 0,6 -0,7 м.

Горизонтальные заземлители находят применение для сезонных установок, работающих в летнее время, для грозозащиты и в других случаях, когда увеличение сопротивления растеканию из-за промерзания земли не учитывается. Однако эффективность заземлителей существенно возрастает при сочетании горизонтальных электродов с вертикальными.

Сопротивление растеканию горизонтального полосового электрода определяется по формуле

$$r_{\Gamma} = \frac{0,366 \rho}{l} \lg \frac{2l^2}{bt}, \quad \text{Ом}, \quad (3.7)$$

где  $l$  – длина полосы, м;  $b$  – ширина полосы, м;  $t$  – глубина заложения, м.

Если горизонтальным электродом служит круглый проводник, то его сопротивление растекания определяется по формуле

$$r_{KP} = \frac{0,366 \rho}{l} \lg \frac{l^2}{dt}, \quad \text{Ом}, \quad (3.8)$$

где  $d$  – диаметр проводника, м; остальные обозначения – по формуле (3.7).

В ориентировочных расчетах сопротивление одиночного горизонтального электрода может быть приближенно принято равным:

$$r_{\Gamma} = \frac{2\rho}{l}, \quad \text{Ом}, \quad (3.9)$$

Из сопоставления формул (3.7) и (3.8) следует, что одинаковые сопротивления растеканию дает круглая сталь диаметром  $d$  и полоса шириной  $b=2d$ .

Круглые проводники обладают в земле большей прочностью в отношении коррозии по сравнению с плоскими того же сечения. Вместе с тем сравнение расхода металла по весу для заземлителей из полосовой и круглой

стали показывает, что применение последней при диаметре выше 10 мм приводит к перерасходу металла. Поскольку к тому же увеличение диаметра мало влияет на сопротивление растеканию, нет оснований увеличивать диаметр сверх 10 мм, если это не требуется по условиям термической устойчивости.

Растекание тока с горизонтальных электродов происходит неравномерно и в значительно большей степени с концов их, у которых напряженность электрического поля выше, чем в средних участках. Это учитывается в приведенных выше расчетных формулах для определения сопротивления растеканию электродов тем, что длина электродов входит в формулы дважды – непосредственно и под знаком логарифма. Таким образом, сопротивление растеканию одиночного электрода уменьшается в зависимости от его длины  $l$ , но не прямо пропорционально значению  $l$ , а в меньшей степени. Например, сопротивление растеканию одной полосы длиной  $l$  будет больше, чем двух полос длиной каждая  $l/2$  (если исключено их взаимное влияние).

Сопротивление растеканию заземлителя в виде кольца из круглой стали определяется по формулам:

при глубине заложения  $t < D/2$

$$r_K = \frac{\rho}{2\pi^2 D} 2,3 \lg \frac{8D^2}{2dt}, \quad \text{Ом}; \quad (3.10)$$

при глубине заложения  $t > D/2$  (углубленные заземлители)

$$r_K = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left( 2,3 \lg \frac{8D}{d} + \frac{\pi D}{2t} \right), \quad \text{Ом}; \quad (3.11)$$

где  $D$  – диаметр кольца, м.

Остальные обозначения в метрах, как выше. При полосовой стали вместо  $d$  принимается  $b/2$ .

Формулой (3.11) можно пользоваться для определения сопротивления растеканию прямоугольника относительно малых размеров; его эквивалентный диаметр принимается равным:

$$D_K = \frac{2(a+b)}{\pi},$$

где  $a$  и  $b$  – длины сторон.

Пластины в качестве заземлителей применяются редко вследствие большого объема требующихся для их укладки земляных работ и большей стоимости. При одинаковом сопротивлении растеканию вес пластины  $1 \times 1$  м, толщиной 3 мм примерно в 3 раза больше веса полосы  $30 \times 4$  мм, длиной 8 м. Пластины располагаются в земле вертикально во избежание нарушения соприкосновения с землей и нарушения контакта при возможных осадках земли. Целесообразно размещение пластин ниже уровня промерзания.

Сопротивление растеканию прямоугольной пластины, заложенной вертикально в земле, может быть приближенно подсчитано по формуле

$$r_{пл} \approx \frac{\rho}{4\sqrt{ab}}, \quad \text{Ом}; \quad (3.12)$$

где  $a$  и  $b$  – длины сторон, м.

При квадратной пластине со сторонами  $a$  сопротивление ее соответственно равно:

$$r_{пл} \approx \frac{\rho}{4a}, \quad \text{Ом}; \quad (3.13)$$

При наличии блуждающих токов, вызывающих коррозию заземлителей, целесообразно применять катодную защиту. Применение этой защиты дает снижение плотности корродирующего тока.

### §3.3. Естественные заземлители

В установках переменного тока для устройства заземлений в целях экономии затрат следует в первую очередь использовать так называемые естественные заземлители. Под естественными заземлителями следует понимать такие находящиеся в земле металлические части различного назначения, которые по своим свойствам одновременно могут быть использованы и для целей заземления.

В качестве естественных заземлителей могут служить: проложенные в земле водопроводные трубы и другие металлические, не покрытые изоляцией трубопроводы, за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывчатых газов; обсадные трубы различного назначения; металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, имеющие надежное соединение с землей; рельсовые пути магистральных неэлектрифицированных и железных дорог и подъездные пути при наличии преднамеренного устройства перемычек между рельсами; другие находящиеся в земле металлические конструкции сооружения; металлические оболочки бронированных кабелей, проложенных в земле, за исключением алюминиевых.

Преимущество протяженных естественных заземлителей – малое сопротивление растеканию. Рациональное использование естественных заземлителей поэтому значительно упрощает осуществление заземлений. Во многих случаях выполнить требования /2/ возможно только с помощью естественных заземлителей.

Недостаток некоторых естественных заземлителей – доступность персоналу, не связанному с электрической установкой, вследствие чего при ремонтных работах может быть нарушена их непрерывность и целостность. Соответствующее обозначение (окраска) и инструктирование персонала имеют целью устранить этот недостаток, и на практике большинство естественных заземлителей зарекомендовало себя как вполне надежные. Другое обстоятельство – все возрастающее применение трубопроводов и оболочек кабелей из синтетических материалов – приводит постепенно к сокращению использования их в качестве естественных заземлителей.

Применение естественных заземлителей не должно снижать надежности заземляющих устройств. Поэтому в качестве естественных заземлителей следует применять лишь стационарные элементы установок; они должны быть занесены в паспорт заземления; у мест присоединения к ним проводников заземления следует иметь опознавательные знаки, исправность заземлителей должна находиться под контролем электротехнического персонала, в

особенности во время ремонтов. Правила допускают применение естественных заземлителей в качестве единственных при условии обеспечения ими требуемой /2/ величины сопротивления. Если единственными заземлителями служат металлические оболочки кабелей, то число их должно быть не менее двух.

Ниже рассмотрены отдельные виды естественных заземлителей.

*Кабели в земле.* Свинцовые оболочки проложенных в земле кабелей могут иметь в эксплуатации достаточно низкие значения сопротивления растеканию, зависящие от их числа, длины, удельного сопротивления земли и состояния покровов. В первое время после укладки целостность изолирующих покровов между оболочкой и броней и поверх брони существенно снижает проводимость оболочек на землю. Алюминиевые оболочки, имеющие прочные изолирующие покровы, защищающие алюминий от коррозии, вообще не могут приниматься в расчет как заземлители, и растекание происходит только с брони. Но использование брони в качестве заземлителя весьма сомнительно как вследствие ее недолговечности из-за коррозии, так и вследствие ее высокого сопротивления как проводника.

При заземлителях относительно короткой длины можно не учитывать падения напряжения в них, вызываемого активным и индуктивным сопротивлением, и считать потенциал такого заземлителя постоянным по длине, а ток растекания равномерно распределенным по длине. В протяженных заземлителях (кабелях, трубопроводах и т. п.) при определении их сопротивления растеканию пренебрегать падением напряжения уже нельзя. При этом потенциал заземлителя и ток, стекающий с него в землю, снижаются по длине; на расстоянии, обычно не превышающем 1,5 – 2 км, потенциал заземлителя приближается к потенциалу земли, и стекание тока в землю прекращается. По этой причине эффективно используемая длина протяженного заземлителя имеет предел порядка 1,5 – 2 км.

Из вышеизложенного следует, что в протяженном заземли теле напряжение и ток вдоль линии нельзя считать неизменными, их величина имеет

различное значение в различных точках, напряжение и ток в конце линии не равны напряжению и току в ее начале. По указанным причинам сопротивление протяженного заземлителя, в данном случае свинцовой оболочки кабеля, определяется как его входное сопротивление, т. е. сопротивление, определяемое подводным напряжением и током в начале (на входе) линии. Этим учитываются указанные выше особенности растекания тока в земле с протяженного заземлителя.

Входное сопротивление проводника (или группы проводников), уже находящегося в земле, может быть измерено с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра.

Расчет протяженного (одиночного) заземлителя производится с учетом того, что каждый сколь угодно малый элемент его длины обладает сопротивлением и индуктивностью, т.е. проводник (заземлитель) рассматривается как линия с распределенными параметрами, и его сопротивление рассчитывается соответственно по формулам, дающим возможность определить сопротивление заземлителя любой длины в условиях из меняющихся напряжения и тока вдоль линии:

$$Z_{BX} = Z_B \operatorname{ch} t \gamma l, \quad \text{Ом}; \quad (3.14)$$

$$Z_B = \sqrt{Z_{PP} r_{II}}, \quad \text{Ом}; \quad (3.14a)$$

$$\gamma = \sqrt{Z_{PP} / r_{II}}, \quad \text{км}^{-1}; \quad (3-14б)$$

где  $Z_B$  – волновое сопротивление проводника (в данном случае металлической оболочки кабеля), Ом;

$\gamma$  – коэффициент распространения токов в цепи «металлические оболочки – земля»,  $\text{км}^{-1}$ ;

$Z_{PP}$  – продольное сопротивление проводника (оболочки кабеля), Ом/км;

$r_{II}$  – переходное сопротивление оболочки кабеля на землю на длине  $l$  км, если принимать его потенциал вдоль линии постоянным, Ом/км;

$l$  – длина заземлителя, км;  $\operatorname{ch}$  – гиперболический котангенс.

Если провод проложен параллельно земле (в воздухе или под землей) и по проводу проходит переменный ток, то возникающее при этом вокруг проводника переменное магнитное поле вызывает в земле вихревые токи; их магнитные поля накладываются на основное поле, в результате чего существенно возрастает реактивное сопротивление линии. Исходя из этого значение  $Z_{\Pi P}$  определяется по равенству, в котором учитывается влияние земли на продольное сопротивление протяженного проводника:

$$Z_{\Pi P} = r_{\Pi P} + 0,05 + j \left( x_{\Pi P}'' + 0,145 \lg \frac{0,178}{r_0 \cdot 10^2 \sqrt{f \frac{10^{-2}}{\rho} \cdot 10^{-9}}} \right) \text{ Ом/км}; \quad (3.15)$$

где  $r_{\Pi P}$  – активное сопротивление проводника, Ом/км;

$x_{\Pi P}''$  – внутреннее индуктивное сопротивление проводника, Ом/км (в расчете сопротивления свинцовой оболочки кабеля значением  $x_{\Pi P}''$  можно пренебречь);

0,05 – активное сопротивление земли, Ом/км;

$r_0$  – радиус проводника, м;

$f$  – частота, в данном случае 50 Гц;

$\rho$  – удельное сопротивление земли, Ом·м.

Сопротивление  $r_{\Pi}$  приближенно принимается на длине 1 км. Тогда его значение можно рассчитать на основе формулы (3.8), принимая в ней все значения в километрах:

$$r_{\Pi} = 0,366 \lg \frac{1}{dt}, \quad \text{Ом} \cdot \text{км}. \quad (3.16)$$

Приведенный метод расчета относится к случаю определения сопротивления одного или группы параллельно работающих проводников (кабелей), причем при двух и более рядом лежащих кабелях для учета их взаимного влияния к значению  $r$  каждого проводника вводятся коэффициенты: при двух кабелях 1,2; при трех – 1,4; шести – 1,5; восьми – 1,6.

*Пример 3.1.* Требуется рассчитать входное сопротивление свинцовой оболочки кабеля АСБ, 6 кВ, 3x120 мм длиной от 0,5 до 2 км, уложенного в земле с  $\epsilon = 100$  Ом·м на глубине  $t = 0,7$  м. Сечение оболочки  $168 \text{ мм}^2$ , диаметр 39 мм;  $r_{\text{пр}} = 1,31 \text{ Ом/км}$  (сопротивление брони не учитываем).

Согласно (3.15) продольное сопротивление свинцовой оболочки кабеля при длине 1 км равно:

$$Z_{\text{пр}} = 1,31 + j0,05 + j0,145 \lg \frac{0,178}{19,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2 \sqrt{50 \frac{10^{-2}}{100} \cdot 10^{-9}}} = 1,36 + j0,145 \lg \frac{0,178}{1,95 \cdot 2,23 \cdot 10^{-6}} = 1,49 \text{ Ом/км}$$

Согласно (3.16)

$$r_{\text{II}} = 0,366 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \lg \frac{1}{39 \cdot 10^{-6} \cdot 0,7 \cdot 10^{-3}} = 0,0366 \cdot 7,566 = 0,28 \text{ Ом} \cdot \text{км}$$

Примем коэффициент, учитывающий промерзание земли,  $k_c = 3,5$ . Тогда значение  $r'_{\text{II}}$  в условиях промерзания равно:

$$r'_{\text{II}} = 0,28 \cdot 3,5 = 0,98 \text{ Ом} \cdot \text{км}$$

Соответственно коэффициенты распространения в значения

$$\gamma = \sqrt{\frac{1,49}{0,28}} = 2,31 \text{ км}^{-1}; \quad \gamma^{-1} = \sqrt{\frac{1,49}{0,98}} = 1,23 \text{ км}^{-1}$$

Определим входные сопротивления свинцовой оболочки кабеля при длинах кабеля от 0,5 до 2 км без учета промерзания земли и с учетом промерзания (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Определение входного сопротивления кабеля

Параметр	Без учета промерзания			С учетом промерзания			
	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5	2
$l$ , км	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5	2
$\gamma l$	1,16	2,31	3,47	0,62	1,23	1,85	2,45
$\text{cth} \gamma l$	1,22	1,01	1	1,82	1,19	1,05	1,01
$Z_B$ , Ом	0,645	0,645	0,645	1,19	1,19	1,19	1,19
$Z_{BX}$ , Ом	0,786	0,652	0,645	2,17	1,42	1,25	1,20

Из табл. 3.3 следует, что в летнее время, начиная с длины ,  $l$  км,  $Z_{BX}$  практически уже не уменьшается, в зимнее время зона растекания, естественно, несколько удлиняется.

Предельная длина проводника, при которой дальнейшее ее увеличение дает снижение входного сопротивления, не превышающее нескольких процентов, приближенно характеризуется отношением  $3/\gamma$  для данного примера это составят:

$$\frac{3}{\gamma} = \frac{3}{2,31} = 1,3 \text{ км}; \quad \frac{3}{\gamma} = \frac{3}{1,23} = 2,44 \text{ км},$$

что соответствует расчету.

*Металлические трубопроводы* в земле имеют, как правило, достаточно малое входное сопротивление, часто даже в тех случаях, когда они покрыты изоляцией.

Аналогично тому, как это было сказано в отношении кабелей, эффективно используемая в качестве заземлителя длина трубопроводов имеет предел, не превышающий 1,5 – 2 км. Поэтому степень разветвленности трубопроводов сказывается на их входном сопротивлении только в пределах ограниченной площади.

Водопроводные трубы обычно укладываются ниже глубины промерзания или высыхания. Поэтому их сопротивление можно считать стабильным в течение года, что не относится к трубопроводам, лежащим в зоне сезонных изменений. Применение водопроводных труб коммунального пользования в качестве заземлителей встречает в последнее время возражения, основанные на следующем:

- начали применяться вставки из полимерных материалов, о которых потребитель не знает, вовсе лишаящие водопроводные трубы свойств заземлителя;

- использование водопровода допустимо, если установлены и сохраняются в эксплуатации перемычки, шунтирующие водомеры, клапаны и т. п., а также устанавливаются перемычки при ремонтах до разбора трубопровода;

- в коммунальных сетях это далеко не всегда выполняется (это послужило причиной случаев смертельного поражения).

Если речь идет о магистральных водопроводных трубах и сетях, находящихся под соответствующим наблюдением, когда указанные недостатки исключены и необходимые меры безопасности соблюдаются, использование этих труб в качестве заземлителей не должно встречать возражений. Надо при этом учитывать, что трубопроводы, отходящие от электростанций и других крупных предприятий, неизбежно имеют многочисленные случайные связи с частями сооружений. Таким образом, более целесообразно с точки зрения выравнивания потенциалов сделать эти связи более надежными и использовать малые входные сопротивления трубопроводов для снижения расходов по устройству заземлителей.

Правила не допускают использования в качестве заземляющих проводников трубопроводов горючих и взрывоопасных смесей. По существу это запрещение относится и к заземлителям. Случайные нарушения контакта в местах соединений или присоединений таких трубопроводов или их частей могут привести к искрообразованию и опасности пожара или взрыва. Надо, однако, учитывать, что и в данном случае избежать всякого рода случайных связей этих трубопроводов через оборудование, конструкции зданий и т. п. невозможно, и указанное запрещение остается чисто формальным. Надежность может достигаться главным образом надлежащим качеством исполнения этих трубопроводов.

Трубопроводы, имеющие изолирующие покрытия для защиты от коррозии, во многих случаях, как было указано, еще сохраняют свойства заземлителей, но их сопротивление растеканию зависит от достаточно неопределенных связей с землей, а водопроводных – с водоемами, артскважинами и т.п. Если трубопроводы для жидкостей собраны из труб с

раструбами на стыках, связь между трубами осуществляется в основном через жидкости, т.е. через значительное сопротивление, а при непроводящих жидкостях этой связи вовсе нет. По этим причинам при использовании трубопроводов в качестве заземлителей необходимы предварительные измерения их сопротивлений и во всяком случае контрольные измерения перед вводом в эксплуатацию.

Предварительные расчеты сопротивлений трубопроводов производятся аналогично расчету сопротивлений металлических оболочек кабеля, причем в продольном сопротивлении должно учитываться активное и внутреннее индуктивное сопротивление трубы. Вопрос об использовании трубопроводов в качестве заземлителей связан также с вопросом о возможности выноса ими потенциала при однофазных коротких замыканиях.

*Обсадные трубы.* Использование обсадных труб артезианских колодцев, скважин, шурфов и т. п. может дать большой эффект.

*Железобетонные конструкции.* Исследования показали, что железобетонные подножки и сваи во влажной, хорошо проводящей земле обладают достаточно высокой и стабильной проводимостью, изменяющейся на протяжении года под действием атмосферных условий так же, как и сопротивление обычных заземлителей, уложенных на той же глубине, в том числе вследствие промерзания. Объясняется это тем, что наряду с высыханием бетона происходит капиллярный подсос влаги из окружающих слоев земли, что делает наружный слой бетона проводящим. Поэтому арматура железобетонных свай или подножников может служить заземлителем.

Возможно использование арматуры железобетонных фундаментов опор воздушных линий в качестве естественных заземлителей в глинистых, суглинистых, супесчаных и других влажных грунтах с удельным сопротивлением до 300 Ом·м (при отсутствии агрессивной среды).

*Сопротивление растеканию железобетонных естественных заземлителей* определяется по формулам для вертикальных заземлителей и плит со следующими особенностями:

- размеры их принимаются по соответствующим размерам стоек и подножников;

- стойки и подножники условно считаются находящимися в однородной среде с эквивалентным удельным сопротивлением  $\rho_{экр} = 1,5 - 1,8\rho$ , коэффициент 1,5 – 1,8 учитывает наличие бетонного слоя и его промерзание.

Сопротивление стойки или сваи рассчитывается, таким образом, по формуле

$$r_{cm} = \frac{0,366 \cdot 1,8\rho}{l} \cdot 1g \frac{4t}{d}, \text{Ом} \quad (3.17)$$

где  $l$  - длина стойки или сваи, м;

$d$  – диаметр стойки или сваи, м; при прямоугольном сечении со сторонами  $a$  и  $b$

$$d = \frac{2(a + b)}{\pi}.$$

Сопротивление горизонтальной плиты подножника может быть рассчитано приближенно по формуле:

$$r_{пл} = \frac{1,8\rho}{2D}, \text{Ом} \quad (3.18)$$

где  $D$  – диаметр плиты, м; при прямоугольной плите со сторонами  $a$  и  $b$

$$D = \frac{2(a + b)}{\pi}.$$

Сопротивление подножника в виде плиты и стойки определяется путем параллельного сложения их сопротивлений с коэффициентом использования 0,8.

Хорошими естественными заземлителями с низким сопротивлением растеканию служат металлические закладные части и находящиеся в воде железобетонные поверхности гидросооружений.

При использовании железобетонных конструкций для возможности их соединений между собой и сетью заземления в них должны быть заранее предусмотрены в соответствующих местах выводы арматуры наружу.

На металлических судах, драгах и т. п. естественными заземлителями служат находящиеся в воде их корпуса.

### §3.4. Коэффициенты использования заземлителей

Обычно заземлители состоят из нескольких, а иногда из весьма большого числа электродов (труб, уголков, стержней, полос). Для того чтобы все электроды заземлителя были использованы в такой же мере, как и одиночный электрод, было бы необходимо, чтобы расстояние между ними было достаточно велико, только при этом условии их сопротивление растеканию будет мало зависеть от влияния соседних электродов.

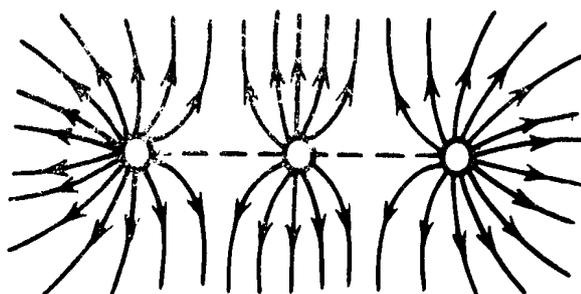


Рис. 3.1. Распределение линий тока параллельно включенных электродов

В действительности расстояния между электродами из условий располагаемого места и в целях выравнивания потенциалов на площадке принимаются значительно более близкими, и как следствие возникает взаимное влияние их электрических полей, т. е. наложение электрических полей отдельных электродов при растекании тока замыкания в землю. Вследствие наложения полей происходят как бы уменьшение действующего сечения земли около электрода и увеличение его сопротивления растеканию (рис. 3.1).

Чем больше число электродов в заземлителе, тем меньше расстояние между ними, тем больше сказывается их взаимное влияние на увеличение сопротивления (или уменьшение проводимости) заземлителя в целом.

Отношение проводимости  $G$  заземлителя в целом к сумме проводимостей отдельных электродов (одинаковых) называется коэффициентом использования  $\eta$  заземлителя:

$$\eta = \frac{G}{g_0 n} = \frac{r_0}{R_3 n}, \quad (3.19)$$

где  $G, R_3$  – соответственно проводимость и сопротивление заземлителя;

$g_0, r_0$  – соответственно проводимость и сопротивление отдельного электрода;

$n$  – число электродов (полос, стержней и т. п.).

Коэффициент использования заземлителя, включающего группу электродов, всегда меньше единицы. Таким образом, сопротивления растеканию групп электродов определяются следующими равенствами:

сопротивление группы горизонтальных электродов

$$R_{\Gamma} = \frac{r_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}}, \text{ Ом}; \quad (3.20)$$

сопротивление группы вертикальных электродов

$$R_B = \frac{r_B}{\eta_B \cdot n}, \text{ Ом}; \quad (3.21)$$

сопротивление горизонтальных электродов в ряду из вертикальных

$$R_{\Gamma.P} = \frac{r_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma.P}}, \text{ Ом}; \quad (3.22)$$

сопротивление горизонтальных электродов в контуре из вертикальных

$$R_{\Gamma.K} = \frac{r_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma.K}}, \text{ Ом}, \quad (3.23)$$

где  $r_{\Gamma}$  – сопротивление соединительной полосы или круглой стали (всей длины) без учета взаимного влияния;

$r_B$  – сопротивление одного вертикального электрода;

$\eta_{\Gamma}, \eta_B, \eta_{\Gamma.P}, \eta_{\Gamma.K}$  – коэффициенты использования групп заземлителей соответственно горизонтальных, вертикальных, горизонтальных в ряду из вертикальных и горизонтальных в контуре из вертикальных.

Таблица 3.4

Коэффициенты использования параллельно уложенных полос (ширина полос  $b=20 - 40$  мм; глубина заложения  $t=0,3 - 0,8$  м)

Длина каждой полосы, м	Число параллельных полос	Расстояние между параллельными полосами, м				
		1	2,5	5	10	15
15	2	0,55	0,65	0,75	0,80	0,85
	5	0,37	0,49	0,60	0,73	0,79
	10	0,25	0,37	0,49	0,64	0,72
25	2	0,50	0,60	0,70	0,75	0,80
	5	0,35	0,45	0,55	0,66	0,73
	10	0,23	0,31	0,43	0,57	0,66
50	2	0,45	0,55	0,65	0,70	0,75
	5	0,33	0,40	0,48	0,58	0,65
	10	0,20	0,27	0,35	0,46	0,53

Таблица 3.5

Коэффициенты использования вертикальных электродов, размещенных в ряд без учета влияния полосы связи

Отношения расстояния между вертикальными электродами к их длине, $a/l$	Число электродов $n$	$\eta_{B.P}$
1	2	0,84—0,87
	3	0,76—0,80
	5	0,67—0,72
	10	0,56—0,62
	15	0,51—0,56
	20	0,47—0,50
2	2	0,90—0,92
	3	0,85—0,88
	5	0,79—0,83
	10	0,72—0,77
	15	0,66—0,73
	20	0,65—0,70
3	2	0,93—0,95
	3	0,90—0,92
	5	0,85—0,88
	10	0,79—0,83
	15	0,76—0,80
	20	0,74—0,79

В сложных заземлителях, состоящих из многих взаимно пересекающихся горизонтальных электродов и контура из вертикальных электродов, возникает

взаимное влияние между отдельными электродами и между обеими группами электродов. Сопротивление растеканию таких заземлителей определяется более сложными методами.

В табл. 3.4 – 3.8 приведены значения коэффициентов использования разных видов и групп заземлителей в однородной земле.

Таблица 3.6

Коэффициенты использования вертикальных электродов, размещенных по контуру, без учета влияния полосы связи

Отношения расстояния между вертикальными электродами к их длине, $a/l$	Число электродов $n$	$\eta_{B.K}$
1	4	0,66 - 0,72
	6	0,58 - 0,65
	10	0,52 - 0,58
	20	0,44 - 0,50
	40	0,38 - 0,44
	60	0,36 - 0,42
	100	0,33 - 0,39
2	4	0,76 - 0,80
	6	0,71 - 0,75
	10	0,66 - 0,71
	20	0,61 - 0,66
	40	0,55 - 0,61
	60	0,52 - 0,58
	100	0,49 - 0,55
3	4	0,84 - 0,86
	6	0,78 - 0,82
	10	0,74 - 0,78
	20	0,68 - 0,73
	40	0,64 - 0,69
	60	0,62 - 0,67
	100	0,59 - 0,65

Приведенные в таблицах значения коэффициентов использования для полос относятся также к электродам из круглой стали.

Таблица 3.7

Коэффициенты использования  $\eta_{Г.Р}$  соединительной полосы в ряду из вертикальных электродов

Отношение расстояния между электродами к их длине, $a/l$	Число вертикальных электродов							
	4	5	8	10	20	30	50	65
1	0,77	0,74	0,67	0,62	0,56	0,51	0,21	0,20
2	0,89	0,86	0,79	0,75	0,42	0,46	0,36	0,34
3	0,92	0,90	0,85	0,82	0,68	0,58	0,49	0,47

Таблица 3.8

Коэффициенты использования  $\eta_{Г.К}$  соединительной полосы в контуре из вертикальных электродов

Отношение расстояния между электродами к их длине, $a/l$	Число вертикальных электродов в заземлителе								
	4	6	8	10	20	30	50	70	100
1	0,45	0,40	0,36	0,34	0,27	0,24	0,21	0,20	0,19
2	0,55	0,48	0,43	0,40	0,32	0,30	0,28	0,26	0,24
3	0,70	0,64	0,60	0,56	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33

### §3.5. Лучевые заземлители

При сооружении воздушных линий и в некоторых иных случаях находят применение заземлители из круглой или полосовой стали, укладываемые в землю на глубину 0,3 – 0,8 м в виде расходящихся лучей.

Сопротивление растеканию такого лучевого заземлителя может быть подсчитано по формуле

$$R_{Л} = \frac{r_{Л}}{n \cdot \eta_{Л}}, \text{ Ом}, \quad (3.24)$$

где  $r_{Л}$  – сопротивление растеканию одного луча, Ом;

$n$  – число лучей;

$\eta_{л}$  – коэффициент использования лучевого заземлителя в системе нескольких лучей.

Таблица 3.9

Коэффициенты использования  $\eta_{л}$  лучевых заземлителей

Длина луча, м	Число лучей			
	3		4	
	диаметр проводника луча, см			
	1	2	1	2
2,5	0,76	0,74	0,63	0,61
5	0,78	0,76	0,67	0,65
10	0,81	0,79	0,70	0,69
15	0,82	0,80	0,72	0,70
30	0,84	0,82	0,75	0,73

Примечание. При применении для лучей полосовой стали эквивалентный диаметр принимается равным  $b/2$ , где  $b$  – ширина полосы.

Для получения оптимального значения коэффициента  $\eta_{л}$  лучи следует располагать под равными углами от центра. Значения  $\eta_{л}$  могут быть приняты по табл. 3.9.

Увеличение числа лучей сверх трех–четырех из-за существенного уменьшения коэффициента использования становится неэкономичным.

### §3.6. Углубленные горизонтальные заземлители

Углубленные горизонтальные заземлители из полосовой или круглой стали закладываются на дно котлованов при сооружении фундаментов опор воздушных линий, зданий цехов, подстанций и др. Глубина заложения таких заземлителей 2,5 – 3 м ниже уровня земли, т. е. ниже глубины промерзания. Преимущество углубленных заземлителей заключается в меньшей подверженности атмосферным влиянием, меньшей величине сопротивления растеканию вследствие укладки в более влажные слои, уменьшении площади,

занимаемой заземлителем, и объема земляных работ, таким образом, в экономии металла и удешевлении заземляющих устройств.

Сопротивление углубленных горизонтальных заземлителей определяется по формулам (3.7) или (3.8), но с учетом взаимного влияния частей заземлителя, а также взаимного влияния этих частей с фундаментами сооружений (стены, опоры, плиты и т. п.);

$$R_y = \frac{r_y}{\eta \cdot \eta_\phi}, \text{ Ом}, \quad (3.25)$$

где  $r_y$  – сопротивление заземлителя по формуле (3.7) или (3.8);

$\eta$  – коэффициент использования собственно заземлителя;

$\eta_\phi$  – коэффициент использования, учитывающий взаимное влияние заземлителя сооружения и фундаментов.

Приближенные значения коэффициентов использования углубленных заземлителей приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Приближенные значения коэффициентов использования углубленных горизонтальных заземлителей

Вид заземлителя	$\eta$	$\eta_\phi$
Протяженный заземлитель в виде одного луча вдоль одной сторон фундамента здания	1	0,9
Протяженный заземлитель в виде двух лучей вдоль сторон фундамента здания (в зависимости от ширины здания): - при ширине до 20 м - при ширине более 20 м	0,95 1	0,9 0,9
Протяженный заземлитель в виде квадрата вдоль сторон фундамента здания с длиной стороны $l$ либо в виде прямого угла с длиной стороны $l_1$ при: $l=6$ м; $l_1=3$ м $l=12$ м; $l_1=6$ м $l=20$ м; $l_1=10$ м и более	0,8 0,85 0,9	0,9 0,9 0,9
При прямоугольнике или угле с неравной длиной сторон значения коэффициентов использования принимаются по длине меньшей стороны		
Кольцевой заземлитель у фундамента опоры или колонны диаметром $D$	Как в п. 3, принимая $l=pD$	

### §3.7. Заземляющая система тросы – опоры

Если заземлители подстанций связаны с заземленными защитными тросами линий, то сопротивление заземлителей опор линии можно учитывать при расчете заземляющих устройств подстанций. При этом должны быть приняты во внимание особенности заземляющей системы тросы – опоры (рис. 3.2).

Часть тока  $I_3$  однофазного замыкания, ответвляясь в систему тросы – опоры, создает вдоль этой протяженной системы на участках троса падения напряжения в результате этого напряжения на заземлителях опор по отношению к земле уменьшаются по мере удаления от места замыкания (подстанции). Соответственно уменьшаются и токи, растекающиеся с этих заземлителей через землю. По мере удаления от места замыкания заземлители опор линии составляют, поэтому все уменьшающуюся часть общей проводимости системы тросы – опоры. Таким образом, эффективно используемое число заземлителей опор имеет некоторый конечный предел.

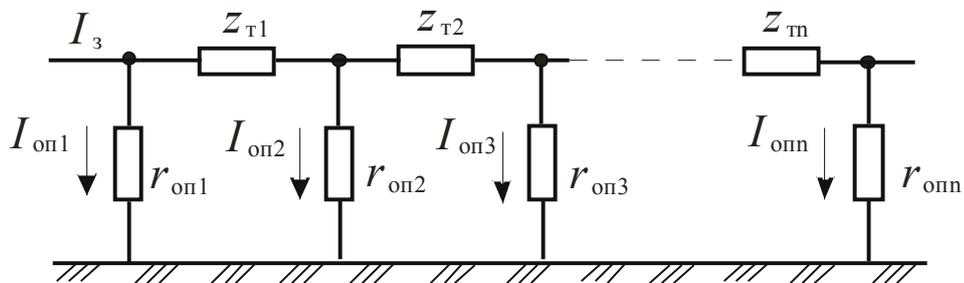


Рис. 3.2. Схема системы заземления «тросы – опоры»

Входное сопротивление системы тросы – опоры может быть определено по формуле

$$\begin{aligned}
 Z_{T-O} &= Z_B \operatorname{cth} \gamma n l, \quad \text{Ом}; \\
 Z_B &= \sqrt{Z_T \cdot r_{OP}}; \\
 \gamma &= \sqrt{\frac{Z_T}{r_{OP}}},
 \end{aligned}
 \tag{3.26}$$

где  $Z_B$  - волновое сопротивление системы тросы – опоры, Ом;

$Z_T$  – продольное сопротивление троса (двух тросов), Ом;

$\gamma$  – коэффициент распространения токов в цепи тросы – опоры – земля, км<sup>-1</sup>,

$r_{оп}$  – сопротивление растеканию одной опоры, Ом;  $n$  – число опор;

$cth$  – гиперболический котангенс,  $l$  – длина пролета, км.

При числе опор более 15 существенно возрастает значение аргумента, котангенс становится равным единице, входное сопротивление системы тросы опоры становится равным волновому сопротивлению и может быть рассчитано по формуле

$$Z_{T-O} = \sqrt{Z_T \cdot r_{оп}}, \text{ Ом.} \quad (3.27)$$

В формулах (3.26) и (3.27) приняты следующие допущения: все пролеты имеют одинаковую длину, одинаковые число, сечение и материал тросов; сопротивления заземлителей опор равны.

*Пример 3.2.* Определить входное сопротивление системы тросы – опоры с двумя стальными тросами сечением 70 мм<sup>2</sup> при длине пролета 200 м и сопротивлении заземлителей опор  $r_{оп} = 10$  Ом. Число опор 15.

Полное сопротивление троса при плотности тока 1 А/мм<sup>2</sup> равно - 2 Ом/км, отсюда сопротивление двух тросов на длине 200 м:

$$Z_T = \frac{2 \cdot 0,2}{2} = 0,2 \text{ Ом,}$$

$$Z_{T-O} = \sqrt{0,2 \cdot 10} cth \left( \sqrt{\frac{0,2}{10}} \right) 15 \cdot 0,2 = 1,41 \cdot 2,5 = 3,5 \text{ Ом.}$$

### **§3.8. Термическая устойчивость и механическая прочность заземлителей**

При прохождении через заземлители больших токов замыкания на землю и недостаточной поверхности заземлителей вначале вследствие нагрева происходит снижение удельного сопротивления земли за счет дополнительного

растворения солей, органических соединений и пр. Далее снижение сопротивления прекращается, и при достаточно высокой температуре ( $\approx 100^\circ\text{C}$ ) происходит интенсивное испарение влаги вблизи заземлителей, иссушение земли и увеличение ее удельного сопротивления. Сопротивление заземлителя при этом значительно возрастает. Существенное значение имеет при этом время прохождения тока замыкания. Проверка достаточности величины поверхности обычных заземлителей не требуется, так как при предписанных Правилами сопротивлениях заземлителей поверхность их достаточно развита и недопустимый нагрев земли не может произойти. Проверка необходима при использовании земли в качестве провода.

Заземлители выполняются в РФ из стали. В соответствии с Правилами для обеспечения механической прочности заземлителей они должны иметь (в нормальных грунтах) следующие минимальные размеры:

Круглые.....Диаметр 10 мм

Прямоугольные .....Сечение 48 мм, толщина 4 мм

Угловая сталь .....Толщина 4 мм

Водогазопроводные трубы..... Толщина стенок 3,5 мм

В агрессивных грунтах должны применяться увеличенные сечения и антикоррозионные покрытия.

Находящиеся в земле заземлители подвержены коррозии, которая приводит к потере их веса.

В настоящее время находит широкое применение модульно-штыревая система заземления GALMAR, предназначенная для организации одноточечного или многоточечного контуров заземления на различных объектах.

Система GALMAR содержит все необходимые для монтажа заземляющего устройства компоненты, легко сопрягаемые друг с другом. Основу системы составляют стальные штыри небольшой длины с медным покрытием, соединительные муфты и вспомогательные элементы. Данная

система обладает надежной защитой смонтированных заземлителей от коррозии – гарантия 30 лет.

### §3.9. Заземлители для защиты от грозových перенапряжений

Заземлители для отвода токов молнии характеризуются величиной импульсного сопротивления. При стекании с заземлителя импульсных токов молнии плотность тока, стекающего с поверхности заземлителя в землю, достигает больших величин; так же велики напряженности электрического поля в земле вблизи заземлителей. Вследствие этого вокруг них возникает пробой земли (искрение), они оказываются в более проводящей среде, благодаря чему удельное сопротивление земли снижается. В результате сопротивление заземлителя при стекании с него импульсных токов оказывается, как правило, ниже, чем при токах промышленной частоты.

Оно равно:

$$R_{II} = \alpha_{II} R, \text{ Ом} \quad (3.28)$$

где  $R$  – сопротивление заземлителя при промышленной частоте 50 Гц;

$\alpha$  – импульсный коэффициент.

Величина импульсного коэффициента зависит от вида заземлителя (труба, стержень, полоса), удельного сопротивления земли, конструктивного выполнения заземлителя и величины тока молнии. Чем больше величина тока, тем интенсивнее искрообразование и тем меньше сопротивление заземлителя. Таким образом, значение импульсного коэффициента снижается с ростом тока. Значения  $\alpha_{II}$  обычно меньше единицы (от 0,3 до 0,9, меньшие значения относятся к более высоким удельным сопротивлениям земли), но при горизонтальных заземлителях относительно значительной протяженности вследствие роста собственной индуктивности заземлителя стекание тока с удаленных его участков снижается, что приводит к увеличению импульсных коэффициентов.

Сопротивление растеканию отдельных частей заземлителя (уголков, труб, стержней, учетом импульсного коэффициента и соответствующего импульсного коэффициента использования.

### **§3.10. Заземлители в местностях с высоким удельным сопротивлением земли**

Устройство заземлителей в плохо проводящей земле – песчаной, скалистой, в вечной мерзлоте – встречает большие затруднения. Правила допускают для местностей с высоким удельным сопротивлением земли (более 500 Ом·м) облегчение расчетных условий. Сопротивление заземляющего устройства может быть в таких условиях принято выше предписанного Правилами в  $s/500$  раз ( $s$  – измеренное удельное сопротивление земли в месте установки, Ом·м), но не выше 10 – кратного. Это допущение основано на том, что при более высоких удельных сопротивлениях земли следует ожидать более низких значений напряжения прикосновения. Однако во многих случаях указанные облегчения недостаточны для выполнения требований Правил, и устройство заземлителей вызывает значительные трудности.

Для снижения сопротивления заземляющего устройства в рассматриваемых условиях может быть рекомендовано одно из следующих мероприятий:

1) устройство вертикальных заземлителей увеличенной длины (глубинных заземлителей), если с глубиной удельное сопротивление земли снижается, а естественные углубленные заземлители (например, скважины с металлическими обсадными трубами) отсутствуют;

2) устройство выносных заземлителей, если вблизи (до 2 км) от электроустановки есть места с меньшим удельным сопротивлением земли;

3) укладка в траншеи вокруг горизонтальных заземлителей в скальных структурах влажного глинистого грунта с последующей трамбовкой и засыпкой щебнем до верха траншеи;

4) применение искусственной обработки грунта с целью снижения его удельного сопротивления, если другие способы не могут быть применены или не дают необходимого эффекта.

В районах многолетней мерзлоты, кроме рекомендаций, приведенных выше, следует:

1) помещать заземлители в непромерзающие водоемы и талые зоны;

2) использовать обсадные трубы скважин;

3) в дополнение к углубленным заземлителям применять протяженные заземлители на глубине около 0,5 м, предназначенные для работы в летнее время при оттаивании поверхностного слоя земли;

4) создавать искусственные талые зоны.

В первую очередь следует изыскивать возможность использования естественных заземлителей. Глубинные и углубленные заземлители дают существенный эффект в песчаных грунтах благодаря увеличению влажности по мере заглубления и отсутствию необходимости учитывать промерзание или высыхание земли. Погружение электродов в песок успешно производится механизированным способом ввертыванием или при помощи вибраторов легкого типа.

Наличие солей во влаге земли значительно уменьшает ее удельное сопротивление. Так, например, добавление 0,1 % поваренной соли к весу влаги суглинка уменьшает его удельное сопротивление примерно на 80%. Так как основную долю сопротивления заземлителя определяет земля в непосредственной от него близости, то при ее обработке можно ограничиться введением соли непосредственно у заземлителей. Обработка земли вокруг вертикальных заземлителей делается примерно на 1/3 их длины в слое с высоким удельным сопротивлением при диаметре обработки земли 0,5 м (рис. 3.3) путем поочередной укладки слоев соли и земли толщиной 1 см. Каждый

слой соли и земли поливается водой из расчета 1 – 1,5 л на 1 кг соли. Расход соли на одну трубу составляет около 30 – 40 кг.

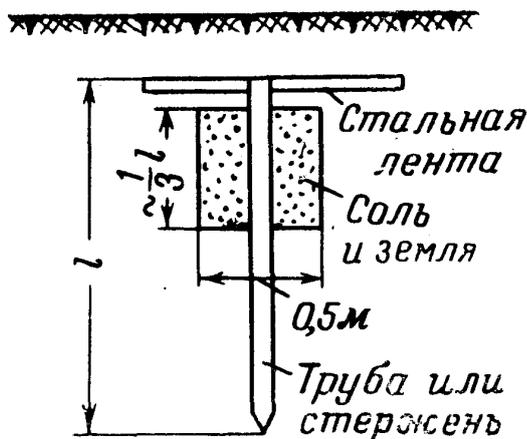


Рис. 3.3. Обработка земли солью вокруг вертикального электрода

Ориентировочно по данным ВЭИ можно считать, что обработка солью дает следующее уменьшение удельного сопротивления: суглинок в 1,5 – 2 раза, супесок в 2,5 – 4 раза, песок в 4,5 – 8 раз. При этом обработанная земля меньше подвержена сезонным колебаниям удельного сопротивления, так как наличие соли снижает температуру замерзания влаги. С течением времени обработка теряет свои свойства из-за растворения солей. Поэтому сопротивление растеканию заземлителя требует периодически измерять и в случае необходимости выполнить повторную обработку.

В качестве обрабатываемого вещества применяется также шлак, смоченный водой. По своей эффективности он, однако, уступает соли. Хорошие результаты получены при обработке песчаной и супесчаной земли суспензиями глины (раствор глины в воде порядка 100 г на литр). Исследования, например, показали, что при цилиндрическом объеме диаметром 1,5 м и длиной 2,6 м может быть достигнуто удельное сопротивление 17 Ом·м.

Обработка солью дает значительный эффект также и в скалистых грунтах.

Вечная мерзлота имеет наиболее высокие значения удельного сопротивления. Например, суглинок, имеющий удельное сопротивление 99 Ом·м при температуре +10°C и влажности 15% к весу, увеличивает удельное

сопротивление при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $3300\text{ Ом}\cdot\text{м}$ , т. е. в 33,4 раза. Удельные сопротивления мерзлой супесчаной и песчаной земли имеют еще более высокие значения и в зависимости от содержания солей, влаги (льдистости), пористости и температуры достигают величин  $10000\text{ Ом}\cdot\text{м}$  и много выше.

Величины удельных сопротивлений вечно мерзлой земли подвержены значительным колебаниям: максимальные значения в разные времена года могут быть выше минимальных в сотни раз.

Чтобы наиболее целесообразно решить вопрос об устройстве заземлений в этих условиях, необходимо иметь данные о земле в месте, где должно быть устроено заземление: удельное сопротивление, влажность, температуры на разной глубине в разное время года. При температурах ниже  $-10^{\circ}\text{C}$  удельные сопротивления настолько повышаются, что устройство заземлителей вызывает слишком большие трудности. При относительно не слишком высоких удельных сопротивлениях мерзлой земли (глина, суглинок с удельным сопротивлением до  $1000\text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) устройство местных заземлителей с обработкой солью еще возможно, но все же вызывает большие трудности. Более целесообразно располагать заземлители в слоях почвы с постоянно талой водой, например под крупными зданиями, либо поддерживать землю в зимнее время в талом состоянии в месте расположения заземлителей искусственным путем (засыпка торфом и т. п.).

Таким образом, напрашивается решение устраивать заземлители в основном в виде полос и коротких стержней в так называемых «деятельных» слоях, при этом нормировать сопротивления заземляющих устройств по их значениям в летнее время. Имеются следующие основания для такого решения:

1) мерзлый грунт имеет настолько большое удельное сопротивление, что напряжения прикосновения не выходят за пределы безопасных значений;

2) измерение сопротивления заземляющих устройств в зимнее время практически невозможно из-за слишком высоких сопротивлений вспомогательного заземлителя и зонда;

3) безопасность обеспечивается тем, что в начале таяния «деятельных» слоев грунта они постепенно становятся проводящими, и протяженные заземлители постепенно достигают необходимой величины сопротивления растеканию.

Указанное решение, уже выполненное в ряде установок, дает большой экономический эффект, и необходимо выполнение опыта эксплуатации этих установок. Недостаток этой системы заключается в том, что в период промерзания «деятельного» слоя сопротивление заземлителя настолько возрастает, что при однофазных замыканиях на стороне 35 кВ напряжение на заземлителе может достигать значения фазного. В результате были случаи обратного пробоя на линиях 6 кВ и у трансформаторов на стороне 0,4 кВ. Предотвратить подобные явления возможно усилением изоляции линий 6 – 10 кВ на близких к подстанции пролетах и усилением изоляции обмоток 0,4 кВ трансформаторов.

Для получения более низких сопротивлений заземлителей в условиях вечной мерзлоты нашли применение глубинные заземлители, выполняемые путем бурения скважин глубиной 20 – 50 м и более. Бурение производится при постоянном наличии в забое насыщенного раствора поваренной соли. В готовую скважину засыпается еще 30 – 50 кг соли, в нее опускается электрод (стальная полоса) с грузом до 50 кг. Скважина заполняется смесью тонкодисперсной земли (глина, пылеватый песок, ил) с 10 – 15% поваренной соли. Необходимая глубина скважины определяется по сопротивлению растеканию бурового инструмента. В выполненных таким образом скважинах были получены сопротивления от нескольких единиц до нескольких десятков Ом. В некоторых случаях для снижения потенциала заземлителей при питании взрывоопасных установок применялись заземлители глубиной до 400 м. При такой глубине на их сопротивлении сказывается уже продольное активное и индуктивное сопротивление.

Экономически приемлемые решения иногда могут дать выносные заземлители.

Поскольку затраты на устройство заземлений в районах с высокими удельными сопротивлениями земли довольно высоки, следует в зависимости от местных условий выбирать на основе обследований наиболее технически и экономически целесообразные решения, максимально используя естественные заземлители. При повышенных значениях сопротивлений заземляющих устройств рекомендуется шире применять меры, способствующие выравниванию потенциалов на защищаемом объекте (присоединение к заземляющей сети всех окружающих металлоконструкций, оборудование трубопроводов; устройство сеток и т. п.). Современным решением является применение модульно-штыревой системы заземления GALMAR.

### **§3.11. Монтаж заземлителей**

Заземлители должны сооружаться в соответствии с проектом, Правилами устройства электроустановок, строительными нормами и правилами (СНиП) и инструкциями монтажных организаций.

Конструктивные части заземлителей и их транспортабельные узлы заготавливаются на заводах и в мастерских монтажных организаций.

Применяемые для укладки в землю электроды и соединительные проводники не должны иметь окраски, должны быть очищены от коррозии, следов масла и т. п. В необходимых случаях при агрессивных средах они должны иметь защитные покрытия или увеличенное сечение.

Вертикальные электроды погружаются в дно траншей глубиной 0,7 – 0,8 м. Верхний конец электрода должен выступать над дном траншей на высоту 0,1 – 0,2 м. Погружение вертикальных электродов производится, как правило, механизированным способом с помощью копров, вибраторов, гидропрессов, методом ввертывания (при стержневых электродах). Для обеспечения безопасности при питании механизмов электроэнергией должны применяться соответствующие защитные меры.

Горизонтальные электроды прокладываются по дну траншеи на глубине 0,5 – 0,8 м. Прокладка на меньшей глубине выполняется в местах присоединений к оборудованию и в скальных грунтах по данным проекта. Электроды из полосовой стали прокладываются на ребро.

Согласно требованиям Правил соединения всех частей заземлителя, а также соединения заземлителей с заземляющими проводниками выполняются электросваркой. При отсутствии электросварочного оборудования может применяться термитная сварка. Качество сварных соединений определяется осмотром, а прочность – ударом молотка весом – 1 кг.

В местах пересечений горизонтальных электродов с подземными сооружениями (трубопроводы, кабели и др.), при пересечении дорог и в других местах, где возможны механические повреждения, горизонтальные электроды защищаются металлическими или асбоцементными трубами.

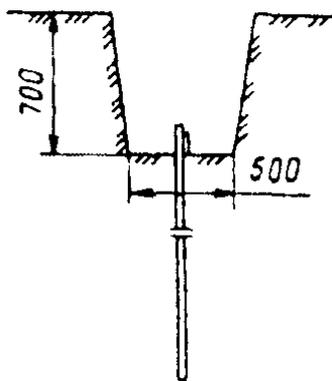


Рис. 3.4. Установка вертикальных заземлителей

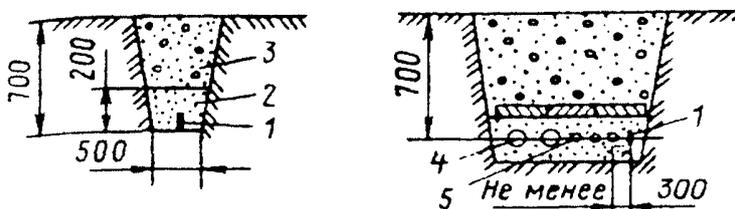


Рис. 3.5. Прокладка горизонтальных заземлителей в траншее (а)  
и совместно с кабелем (б):

1 - полоса; 2 - мягкий грунт; 3 - грунт; 4 - силовые кабели; 5 - контрольные кабели

Прокладку заземлителей параллельно кабелям или трубопроводам следует выполнять на расстоянии не менее 0,3 м, а при пересечениях - не менее 0,1 м.

Траншеи для горизонтальных заземлителей должны быть заполнены сначала однородным грунтом, не содержащим щебня и строительного мусора, с утрамбовкой на глубину 200 мм, а затем - местным грунтом.

Если диаметр горизонтального стального заземлителя меньше 12 мм, то необходимо при расположении этого заземлителя ближе, чем 0,3 м от железобетонного фундамента, изолировать часть заземлителя на расстоянии в обе стороны от фундамента до 0,5 м.

Места входа в грунт заземлителей и места пересечения ими грунтов с различной воздухопроницаемостью рекомендуется гидроизолировать.

При пересечении трасс кабелей, имеющих свинцовую или алюминиевую оболочку, с трассой горизонтального стального заземлителя, если оба элемента прокладывают непосредственно в грунте, расстояние между заземлителем и кабелем в местах пересечения должно быть выбрано не менее 1 м.

При невозможности выполнения этого требования кабель рекомендуется прокладывать максимально близко к заземлителю и его оболочку следует дополнительно соединить с заземлителем. Место соединения необходимо гидроизолировать.

Гидроизоляцию можно выполнить при помощи противокоррозионных лент, полихлорвиниловых обмоток и тафтяных лент с пропиткой их горячим битумом. Верхняя точка наложения изоляции должна находиться на 10 - 15 см выше поверхности грунта, нижняя - на том же расстоянии ниже уровня поверхности или под слоем раздела грунтов в случае их неоднородности.

Рытье траншей производится экскаваторами или канавокопателями, засыпка – бульдозерами. В неудобных для применения механизмов местах рытье траншей и засыпка производятся вручную.

Траншеи с уложенными в них электродами должны засыпаться землей, не содержащей камней и строительного мусора. Засыпка производится с плотной

утрамбовкой. Перед засыпкой траншей проверяется качество соединений и составляется акт по установленной форме на скрытые работы. На чертежах наносятся все отступления от проекта.

По окончании монтажа при сдаче в эксплуатацию производятся соответствующие измерения и испытания.

В случае использования модульной системы GALMAR вертикальные элементы заземлителей монтируются из штырей, заглубляемых в землю с помощью обычного перфоратора. Для получения нужной длины штыри соединяются между собой резьбовыми муфтами. Монтируемый контур заземления может иметь удобную для конкретного случая конфигурацию с любым числом вертикальных элементов, а сами вертикальные элементы могут быть смонтированы на любую глубину:

- традиционный монтаж (2 – 6 м);
- глубинный монтаж (6 – 40 м).

Способ монтажа выбирается в зависимости от доступной площади и типа грунта. Глубинный монтаж является наиболее технологичным:

- минимальная площадь контура заземления;
- сопротивление заземлителей не зависит от погоды;
- минимум земляных работ;
- возможность монтажа внутри периметра зданий (в подвалах).

## **ГЛАВА 4. РАСЧЕТ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ**

### **§4.1. Основные положения**

В зависимости от требований, которые предъявляют к заземлениям нормы разных стран, целью расчетов заземлителей может быть определение одной из величин сопротивления заземлителя, напряжения прикосновения и шага, максимального потенциала, либо то или иное сочетание этих величин, а также определение оптимальных параметров заземлителей.

При расчетах целесообразно применять различные методы для простых и сложных заземлителей. к простым заземлителям могут быть отнесены один – два ряда горизонтальных электродов, один – два ряда вертикальных, соединенных полосой или круглой сталью, прямоугольник из горизонтальных и вертикальных заземлителей ограниченной длины, лучевой заземлитель, углубленный горизонтальный и т. п., т. е. в основном заземлители для установок напряжением до 1000 В и 6 – 35 кВ с изолированной нейтралью, а также заземлители опор воздушных линий. Расчет их с достаточной для практических целей точностью может вестись методом коэффициентов использования при однородной земле (но с учетом неоднородности, вызываемой промерзанием или высыханием).

Более точные и сложные методы в данных случаях мало оправданы ввиду относительно небольшой экономии, которую может дать их применение. Сложные заземлители сооружаются в установках напряжением 110 кВ и выше с глухим заземлением нейтрали.

### **§4.2. Расчет простых заземлителей**

Расчет заземляющих устройств сводится главным образом к расчету собственно заземлителя, так как заземляющие проводники в большинстве

случаев принимаются по условиям механической прочности и стойкости к коррозии по /2/. Исключение составляют лишь установки с выносным заземляющим устройством. В этих случаях рассчитываются последовательно включаемые сопротивления соединительной линии и заземлителя, так чтобы их суммарное сопротивление не превышало допустимого.

Сопротивление заземлителя определяется отношением напряжения на заземлителе относительно точки нулевого потенциала к току, протекающему через заземлитель,

$$R_{зм} = \frac{U_{зм}}{I_{зм}}. \quad (4.1)$$

Таким образом, сопротивление заземляющего устройства включает сопротивление заземлителя (активное) и сопротивление заземляющей сети (активное и индуктивное, доля индуктивного сопротивления растет при применении стальных проводников).

*Электроустановки напряжением выше 1000 В с большими токами замыкания на землю.* Согласно /2/ сопротивление заземляющего устройства в этих электроустановках не должно превышать 0,5 Ом. Однако одно лишь ограничение сопротивления заземляющего устройства не обеспечивает приемлемых напряжений прикосновения и шага при токах замыкания на землю в несколько килоампер. Например, при токе короткого замыкания 6 кА на заземляющем устройстве будет напряжение 3 кВ. Поэтому дополнительно к ограничению сопротивления заземляющего устройства предусматривается также выполнение следующих мероприятий:

- 1) быстросрабатывающее отключение при замыканиях на землю;
- 2) выравнивание потенциалов в пределах территории, на которой находится электроустановка, и на ее границах.

*Электроустановки напряжением выше 1000 В с малыми токами замыкания на землю.* В соответствии с требованиями /2/ в электроустановках без компенсации емкостных токов сопротивление заземляющего устройства при протекании через него расчетного тока в любое время года должно

удовлетворять условию, Ом,

$$r \leq \frac{U_{расч}}{I_{расч}}, \quad (4.2)$$

где  $I_{расч}$  - расчетный ток через заземляющее устройство, А;

$U_{расч}$  - расчетное напряжение на заземляющем устройстве по отношению к земле, В.

Расчетным током является полный ток замыкания на землю при полностью включенных присоединениях электрически связанной сети.

Расчетный ток замыкания на землю может быть найден из выражения, А,

$$I_{расч} = \frac{U(35l_k + l_B)}{350}, \quad (4.3)$$

где  $U$  - междуфазное напряжение сети, кВ;

$l_k, l_B$  - общая длина электрически связанных между собой кабельных и воздушных линий, км.

Если заземляющее устройство используется только для электроустановок напряжением выше 1000 В,  $U_{расч}$  принимается равным 250 В; если заземляющее устройство одновременно используется и для электроустановок напряжением до 1000 В,  $U_{расч} = 125$  В.

Сопротивление заземляющего устройства для сетей напряжением выше 1000 В с малыми токами замыкания на землю должно быть не более 10 Ом.

В сетях с компенсацией емкостных токов сопротивление заземляющего устройства рассчитывается по формуле (4.2). При этом в качестве расчетного тока следует принимать:

1) для заземляющих устройств, к которым присоединены компенсирующие аппараты, ток, равный 125% номинального тока этих аппаратов,

2) для заземляющих устройств, к которым не присоединены компенсирующие аппараты, наибольший остаточный ток замыкания на землю, который может иметь место в сети при отключении наиболее мощного из

компенсирующих аппаратов, но не менее 30 А.

С целью облегчения устройства заземлений /2/ допускают во всех электроустановках с малыми токами замыкания на землю рассчитывать заземляющие устройства по формуле (4.2), принимая в качестве расчетного ток срабатывания релейной защиты или ток плавления предохранителей, если эта защита обеспечивает отключение замыканий на землю. При этом наименьший в условиях эксплуатации ток замыкания на землю должен быть не менее полуторакратного тока срабатывания релейной защиты или трехкратного номинального тока предохранителей.

*Электроустановки напряжением до 1000 В с глухим заземлением нейтрали.* Согласно /2/ сопротивление заземляющего устройства в установках напряжением до 1000 В с глухим заземлением нейтрали должно быть не более 4 Ом. Исключение составляют электроустановки, в которых суммарная мощность установленных генераторов и трансформаторов не превышает 100 кВ·А. В этих случаях заземляющие устройства могут иметь сопротивления не более 10 Ом.

Части электроустановок, подлежащие заземлению, должны иметь надежную металлическую связь с нейтралью источника питания, выполняемую с помощью заземляющих проводников или нулевого провода. При воздушных линиях металлическая связь с нейтралью источника питания осуществляется при помощи специального нулевого провода, прокладываемого на опорах так же, как и фазные провода. При этом через каждые 250 м, а также на концах линий и ответвлений длиной более 200 м должны устраиваться повторные заземления нулевого провода. Сопротивление заземляющих устройств каждого из повторных заземлений должно быть не более 10 Ом. В сетях с суммарной мощностью питающих генераторов и трансформаторов 100 кВ·А и менее, для которых допущено сопротивление основного заземляющего устройства 10 Ом, сопротивление заземляющих устройств каждого из повторных заземлений должно быть не более 30 Ом при числе их не менее трех.

С целью обеспечения автоматического отключения участка с однофазным

замыканием заземляющие проводники должны быть выбраны таким образом, чтобы при замыкании на корпус или на нулевой провод возник ток короткого замыкания, превышающий:

1) в 3 раза номинальный ток плавкой вставки ближайшего предохранителя;

2) в 3 раза номинальный ток замедленного расцепителя автоматического выключателя, имеющего обратозависимую от тока характеристику.

При защите сетей автоматическими выключателями, имеющими только электромагнитный расцепитель, заземляющие проводники должны быть выбраны таким образом, чтобы в петле фаза — нуль был обеспечен ток короткого замыкания, равный току уставки электромагнитного расцепителя, умноженному на коэффициент, учитывающий разброс, и на коэффициент запаса, равный 1,1.

При отсутствии заводских данных по разбросу кратность тока короткого замыкания относительно тока уставки электромагнитного расцепителя следует принимать равной: для автоматов с номинальным током до 100 А 1,4; для прочих автоматов 1,25.

Полная проводимость заземляющих проводников во всех случаях должна составлять не менее 50% проводимости фазного проводника. Условия в отношении тока замыкания на землю должны проверяться испытаниями или измерениями до ввода электроустановки в эксплуатацию, а также периодически в процессе ее эксплуатации. В целях удовлетворения указанных требований в отношении тока замыкания заземляющие проводники рекомендуется прокладывать совместно или в непосредственной близости с фазными.

Не допускается использование свинцовых оболочек кабелей в качестве заземляющих проводников.

В условиях проектирования для проверки обеспечения отключения замыканий между фазным и нулевым проводами ток однофазного замыкания определяется по приближенной формуле

$$I_{3M} = \frac{U_{\phi}}{Z + \frac{1}{3}Z_{T.O}}, \quad (4.4)$$

где  $U_{\phi}$  - фазное напряжение сети;

$Z_{T.O}$  - полное сопротивление нулевой последовательности трансформатора;

$Z$  - полное сопротивление петли фаза - нуль.

*Электроустановки напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью.*

Сопротивление заземляющего устройства согласно /2/ не должно превышать 4 Ом, а в электроустановках с суммарной мощностью параллельно работающих генераторов и трансформаторов 100 кВ·А и ниже не должно быть выше 10 Ом.

В месте установки трансформаторов при совместном использовании заземляющего устройства для сетей напряжением до 1000 В и выше сопротивление заземляющего устройства должно удовлетворять формуле (4.2) при расчетном напряжении на заземляющем устройстве  $U_{расч} = 125$  В. Это требование предусматривает снижение опасных последствий при повреждении трансформатора с замыканием между обмотками высшего и низшего напряжений. При этом если при повреждении не произойдет отключения от действия защиты высшей стороны, через пробивной предохранитель и заземляющее устройство будет протекать ток замыкания на землю сети высшего напряжения.

При однофазных замыканиях в сетях до 1000 В в месте замыкания протекает ток, обусловленный проводимостями (активной и емкостной) фаз на землю. Напряжение на заземлителе относительно точки нулевого потенциала равно:

$$U_{3M} = I_{3M} R_{3M}, \quad (4.5)$$

где  $I_{3M}$  - ток замыкания, А;  $R_{3M}$  - сопротивление заземляющего устройства, не превышающее 4 Ом (или 10).

Наибольшее значение напряжения прикосновения при этом составляет несколько десятков вольт. Поэтому в коротких сетях с малой проводимостью на землю неоспоримы преимущества сетей с изолированной нейтралью с точки

зрения электробезопасности.

Следует особо выделить вопросы расчета заземляющих устройств для заполярных и северо-восточных районов нашей страны. Для них характерны многомерзлые грунты, имеющие удельное сопротивление поверхностных слоев на один — два порядка выше, чем в обычных условиях средней полосы России.

Расчет сопротивления заземлителей в других районах производится в следующем порядке:

1. Устанавливается необходимое по [2] допустимое сопротивление заземляющего устройства. Если заземляющее устройство является общим для нескольких электроустановок, то расчетным сопротивлением заземляющего устройства является наименьшее из требуемых.

2. Определяется необходимое сопротивление искусственного заземлителя с учетом использования естественных заземлителей, включенных параллельно, из выражений

$$\frac{1}{R_{И}} = \frac{1}{r_{зм}} + \frac{1}{R_e} \quad \text{или} \quad R_{И} = \frac{R_e r_{зм}}{R_e + r_{зм}}, \quad (4.6)$$

где  $r_{зм}$  - допустимое сопротивление заземляющего устройства по п. 1;

$R_{И}$  - сопротивление искусственного заземлителя;

$R_e$  - сопротивление естественного заземлителя.

3. Определяется расчетное удельное сопротивление грунта  $\rho_{расч}$  с учетом повышающих коэффициентов, учитывающих высыхание грунта летом и промерзание зимой.

При отсутствии точных данных о грунте можно воспользоваться табл. 3.1, где приведены средние данные по сопротивлениям грунтов, рекомендуемые для предварительных расчетов.

Измерение удельного сопротивления для получения более надежных результатов производят в теплое время года (май - октябрь) в средней полосе России. К измеренному значению удельного сопротивления грунта в зависимости от состояния грунта и от количества осадков вводятся

поправочные коэффициенты  $\eta$ , учитывающие изменение вследствие высыхания и промерзания грунта, т. е.  $\rho_{расч} = \rho\eta$ .

Значения  $\eta$ , рекомендованные ВЭИ для средней полосы России, приведены в табл. 4.2; для других климатических зон они принимаются по данным табл. 3.2.

4. Определяется сопротивление растеканию одного вертикального электрода  $R_{B,O}$  по формулам, приведенным в §3.2 или табл. 4.1. Эти формулы даны для стержневых электродов из круглой стали или труб. При применении вертикальных электродов из угловой стали, в формулу вместо диаметра трубы подставляется эквивалентный диаметр уголка, вычисленный по выражению

$$d_{y, эк} = 0,95 b, \quad (4.7)$$

где  $b$  - ширина сторон уголка.

5. Определяется теоретическое число вертикальных электродов по выражению

$$n_{т} = \frac{R_{B,O}}{R_{И}}, \quad (4.8)$$

6. Определяется число вертикальных заземлителей при предварительно принятом коэффициенте использования, определенном с учетом  $n_{т}$  и отношения  $a/l$  по табл.3.5 при расположении вертикальных электродов в ряд или 3.6 при расположении вертикальных электродов по контуру

$$n = \frac{R_{B,O}}{\eta_B \cdot R_{И}}, \quad (4.9)$$

где  $R_{B,O}$  - сопротивление растеканию одного вертикального электрода, определенное в п. 4;

$R_{И}$  - необходимое сопротивление искусственного заземлителя;

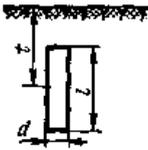
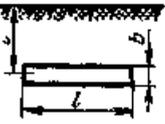
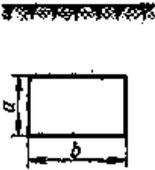
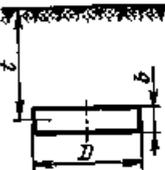
$\eta_B$  - коэффициент использования вертикальных заземлителей.

7. Определяется сопротивление растеканию горизонтальных электродов  $R_{Г}$  по формулам, приведенным в §3.2 или табл. 4.1 с учетом коэффициента использования горизонтальных электродов. Коэффициенты использования

горизонтальных электродов для предварительно принятого числа вертикальных электродов принимаются по табл. 3.7 при расположении вертикальных электродов в ряд и по табл. 3.8 при расположении вертикальных электродов по контуру.

Таблица 4.1

Формулы для определения сопротивления растеканию тока различных заземлителей

Тип заземлителя	Расположение заземлителя	Формула	Примечание
Вертикальный, из круглой стали, верхний конец у поверхности земли		$R_{B.O} = \frac{\rho_{расч.В}}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	$l > d$
Вертикальный, из круглой стали, верхний конец ниже уровня земли		$R_{B.O} = \frac{\rho_{расч.В}}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-1} \right)$	$l > d$
Горизонтальный, из полосовой стали, протяженный, ниже уровня земли		$R_{Г} = \frac{\rho_{расч.Г}}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bt}$	$\frac{l}{2t} \geq 2,5;$ $b$ – ширина полосы; если заземлитель круглый, диаметром $d$ , то $b = 2d$
Пластинчатый, вертикальный, ниже уровня земли		$R_{B.O} \approx 0,25 \frac{\rho_{расч.В}}{\sqrt{ab}}$	$a$ и $b$ размеры стороны пластины
Кольцевой, из полосовой стали, ниже уровня земли		$R_{Г} = \frac{\rho_{расч.Г}}{2\pi^2 D} \ln \frac{8D^2}{bt}$	$b$ - ширина полосы; $t < D/2$ ; если заземлитель круглый, диаметром $d$ , то $b = 2d$

8. Уточняется необходимое сопротивление вертикальных электродов с учетом проводимости горизонтальных соединительных электродов из выражений

$$\frac{1}{R_B} = \frac{1}{R_H} = \frac{1}{R_G} \quad \text{или} \quad R_B = \frac{R_G R_H}{R_G - R_H} \quad (4.10)$$

где  $R_G$  - сопротивление растеканию горизонтальных электродов, определенное в п. 7;

$R_H$  - необходимое сопротивление искусственного заземлителя.

9. Уточняется число вертикальных электродов с учетом коэффициентов использования по табл. 3.5 и 3.6:

$$n = \frac{R_{B,0}}{\eta_B R_B}. \quad (4.11)$$

10. Производится проверка выполнения условия

$$R_H = \frac{R_{B,0} R_{Г1}}{R_{Г1} \eta_B + R_B \eta_G} < r_{зм} \quad (4.12)$$

11. Для установок выше 1000 В с большими токами замыкания на землю проверяется термическая стойкость соединительных проводников по формуле

$$S = I_{зм} \frac{\sqrt{t_{п}}}{C}, \quad (4.13)$$

где  $I_{зм}$  - установившийся ток к. з., А;

$t_{п}$  - приведенное время прохождения тока на землю, с;

$C$  – постоянная, для стали 74, для голых медных проводников 195, для кабелей напряжением до 10 кВ с медными жилами 182, для голых алюминиевых проводников и кабелей с алюминиевыми жилами напряжением до 10 кВ - 112.

В качестве установившегося тока к.з. при расчетах принимается наибольший ток, проходящий через проводник при замыкании на рассматриваемом устройстве или при однофазных замыканиях на землю вне его, для возможной в эксплуатации схемы сети с учетом распределения тока

к.з. на землю между заземленными нейтральными сетями.

Таблица 4.2

Коэффициенты повышения сопротивления по отношению к измеренному удельному сопротивлению грунта (или сопротивлению заземления) для средней полосы России

Заземлители	Глубина заложения, м	Поправочный коэффициент		
		$\kappa_1$	$\kappa_2$	$\kappa_3$
Углубленные (стержни, уголки, трубы)	Верхний конец ниже поверхности земли на 0,8 м	2,0	1,5	1,4
Поверхностные (полоса, пластина и т.д.)	0,5	6,5	5,0	4,5
	0,8	3,0	2,0	1,6

Примечания: 1)  $\kappa_1$  применяется, если измеренная величина  $\rho(R_x)$  соответствует примерно минимальному значению (грунт влажный - времени измерений предшествовало выпадение большого количества осадков); 2)  $\kappa_2$  применяется, если измеренная величина  $\rho(R_x)$  соответствует примерно среднему значению (грунт средней влажности - времени измерений предшествовало выпадение небольшого количества осадков); 3)  $\kappa_3$  применяется, если измеренная величина  $\rho(R_x)$  соответствует примерно наибольшему значению (грунт сухой - времени измерений предшествовало выпадение незначительного количества осадков).

*Пример 4.1.* Требуется рассчитать заземление подстанции с двумя трансформаторами 10/0,4 кВ мощностью 630 кВ·А со следующими данными: наибольший ток через заземление при замыкании на землю на стороне 10 кВ 18 А; грунт в месте сооружения - глина; климатическая зона 3.

Решение.

Предполагается сооружение заземлителя с внешней стороны здания, к которому примыкает подстанция, с расположением вертикальных электродов в

один ряд; материал - круглая сталь диаметром 20 мм, метод погружения — ввертывание; верхние концы вертикальных стержней, погруженные на глубину 0,7 м, приварены к горизонтальному электроду из той же стали.

1. Для стороны 10 кВ требуется сопротивление заземления, определяемое формулой (4.2):

$$r_{3M} = \frac{125}{18} = 6,95 \text{ Ом},$$

где расчетное напряжение на заземляющем устройстве принято равным 125 В, так как заземляющее устройство выполняется общим для сторон 10 и 0,4 кВ. Согласно [2] сопротивление заземления не должно превышать 4 Ом. Таким образом, расчетным является сопротивление заземления  $r_{3,М} = 4 \text{ Ом}$ .

2. Сопротивление искусственного заземлителя

$$R_{И} = 4 \text{ Ом}.$$

3. Рекомендуемое для расчетов сопротивление грунта в месте сооружения заземления (глина) по табл. 3.1 составляет 70 Ом·м. Повышающие коэффициенты  $k$  для 3-й климатической зоны по табл. 3.2 принимаются равными 2,2 для горизонтальных электродов при глубине заложения 0,7 м и 1,5 для вертикальных электродов длиной 2 - 3 м при глубине заложения их верхнего конца 0,5 - 0,8 м.

Расчетные удельные сопротивления грунта:

- для горизонтальных электродов  $\rho_{расч,Г} = 2,2 \cdot 70 = 154 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;

- для вертикальных электродов  $\rho_{расч,В} = 1,5 \cdot 70 = 105 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

4. Определяется сопротивление растеканию одного стержня диаметром 20 мм, длиной 2 м при погружении ниже уровня земли на 0,7 м по формуле из табл. 3.11:

$$R_{B,O} = \frac{\rho_{расч,В}}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \frac{105}{2\pi \cdot 2} \left( \ln \frac{2 \cdot 2}{0,02} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 1,7 + 2}{4 \cdot 1,7 - 2} \right) = 46,7 \text{ Ом}.$$

5. Определяется теоретическое число вертикальных электродов по выражению

$$n_T = \frac{R_{B.O}}{R_H} = \frac{46,7}{4} = 11,68 \approx 12.$$

6. Определяется число вертикальных заземлителей с учетом коэффициента использования  $\eta_{B.P} = 0,70$ , который определен по табл. 3.5 при  $n_T = 12$  и  $a/l=2$

$$n = \frac{46,7}{0,70 \cdot 4} = 16,7.$$

7. Определяется сопротивление растеканию горизонтального электрода из круглой стали диаметром 20 мм, приваренного к верхним концам вертикальных стержней, с учетом коэффициента использования горизонтального электрода. Коэффициент использования горизонтального электрода в ряду из стержней при числе их примерно 17 и отношении расстояния между стержнями к длине стержня  $a/l = 2$  в соответствии с табл. 3.7 принимается равным 0,52.

Сопротивление растеканию горизонтального электрода без учета коэффициента использования горизонтального электрода определяется по формуле из табл. 3.11.

$$R_{Г1} = \frac{\rho_{расч,Г}}{2\pi l_{Г}} \cdot \ln \frac{2l_{Г}^2}{bt} = \frac{154}{2\pi \cdot 64} \cdot \ln \frac{2 \cdot 64^2}{2 \cdot 0,02 \cdot 0,7} = 4,82 \text{ Ом.}$$

Сопротивление растеканию горизонтального электрода с учетом коэффициента использования горизонтального электрода

$$R_{Г} = \frac{R_{Г1}}{\eta_{Г.P}} = \frac{4,82}{0,52} = 9,27 \text{ Ом.}$$

8. Уточненное сопротивление растеканию вертикальных электродов с учетом горизонтальных электродов

$$R_B = \frac{9,27 \cdot 4}{9,27 - 4} = 7,04 \text{ Ом.}$$

9. Уточненное число вертикальных электродов определяется при коэффициенте использования  $\eta_{B.P} = 0,67$ , принятом из табл. 3.5 при  $n = 16$  и  $a/l = 2$  ( $n = 16$  вместо 17 принято из условия уменьшения числа

вертикальных электродов при учете проводимости горизонтального электрода)

$$n = \frac{46,7}{0,67 \cdot 7,04} \approx 10.$$

10. Производится проверка выполнения условия

$$R_{II} = \frac{R_{B.O} R_{\Gamma}}{R_{\Gamma} n \eta_B + R_{B.O} \eta_{\Gamma}} = \frac{46,7 \cdot 4,82}{4,82 \cdot 10 \cdot 0,72 + 46,7 \cdot 0,75} = 3,22 < 4 \text{ Ом.}$$

Условие выполняется.

Окончательно принимается десять вертикальных стержней, при этом сопротивление растеканию несколько меньше расчетного.

*Пример 4.2.* Требуется рассчитать контурный заземлитель подстанции (ПС) 110/10 кВ со следующими данными: наибольший ток через заземление при замыканиях на землю на стороне 110 кВ - 3,2 кА, наибольший ток через заземление при замыканиях на землю на стороне 10 кВ - 42 А; грунт в месте сооружения подстанции - суглинок; климатическая зона 2; дополнительно в качестве заземления используется система тросы - опоры с сопротивлением заземления 1,2 Ом.

Решение.

1. Для стороны 110 кВ требуется сопротивление заземления 0,5 Ом, Для стороны 10 кВ по формуле (4.1) имеем:

$$r_{3M} = \frac{125}{42} \approx 3 \text{ Ом,}$$

где расчетное напряжение на заземляющем устройстве  $U_{расч}$  принято равным 125 В, так как заземляющее устройство используется также и для установок подстанции напряжением до 1000 В.

Таким образом, в качестве расчетного принимается сопротивление  $r_{3M} = 0,5 \text{ Ом.}$

2. Сопротивление искусственного заземлителя рассчитывается с учетом использования системы тросы - опоры

$$\frac{1}{R_{II}} = \frac{1}{0,5} - \frac{1}{1,2} = 2 - 0,833 = 1,167; \quad R_{II} = \frac{1}{1,167} = 0,857 \text{ Ом.}$$

3. Рекомендуемое для предварительных расчетов удельное сопротивление грунта в месте сооружения заземлителя (суглинка) по табл. 3.1 составляет 100 Ом·м. Повышающие коэффициенты  $k$  определяются по табл. 3.2 для горизонтальных протяженных электродов при глубине заложения 0,8 м равны 4,5 и соответственно 1,8 для вертикальных стержневых электродов длиной 2 - 3 м при глубине заложения их вершины 0,5 - 0,8 м.

Расчетные удельные сопротивления: для горизонтальных электродов  $\rho_{расч,Г} = 4,5 \cdot 100 = 450 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ; для вертикальных электродов  $\rho_{расч,В} = 1,8 \cdot 100 = 180 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

4. Определяется сопротивление растеканию одного вертикального электрода - уголка № 50 длиной 2,5 м при погружении ниже уровня земли на 0,7 м по формуле из табл. 3.11.

$$R_{B,O} = \frac{\rho_{расч}}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right),$$

где  $d = d_{V,ЭД} = 0,95$ ;  $b = 0,95 \cdot 0,05 = 0,0475 \text{ м}$ ;  $t = 0,7 + 2,5/2 = 1,95 \text{ м}$ ;

$$R_{B,O} = \frac{\rho_{расч,В}}{2\pi \cdot 2,5} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot 2,5}{0,0475} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 1,95 + 2,5}{4 \cdot 1,95 - 2,5} \right) = 57,2 \text{ Ом.}$$

5. Определяется теоретическое число вертикальных электродов по выражению

$$n_{т} = \frac{R_{B,O}}{R_{II}} = \frac{57,2}{0,857} = 66,7 \approx 67.$$

6. Определяется число вертикальных заземлителей с учетом коэффициента использования  $\eta_{B,K} = 0,52$ , который определен по табл. 3.6 при  $n = 67$  и  $a/l = 2$

$$n = \frac{57,2}{0,52 \cdot 0,857} = 128.$$

7. Определяется сопротивление растеканию горизонтальных электродов

(полосы  $40 \times 4 \text{ мм}^2$ ), приваренных к верхним концам уголков, с учетом коэффициента использования горизонтального электрода. Коэффициент использования соединительной полосы в контуре  $\eta_{Г.К}$  при числе уголков примерно 100 и отношении  $a/l = 2$  по табл. 3.8 равен 0,24.

Сопротивление растеканию полосы по периметру контура ( $l_r = 635 \text{ м}$ ) без учета коэффициента использования горизонтального электрода определяется по формуле из табл. 3.11:

$$R_{Г1} = \frac{\rho_{расч}}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bt} = \frac{450}{2\pi \cdot 635} \cdot \ln \frac{2 \cdot 635^2}{0,04 \cdot 0,7} = 1,94 \text{ Ом.}$$

Сопротивление растеканию горизонтального электрода с учетом коэффициента использования горизонтального электрода

$$R_{Г} = \frac{R_{Г1}}{\eta_{Г.К}} = \frac{1,94}{0,24} = 8,08 \text{ Ом.}$$

8. Уточненное сопротивление вертикальных электродов

$$R_{В} = \frac{8,08 \cdot 0,857}{8,08 - 0,857} = 0,959 \text{ Ом.}$$

9. Уточненное число вертикальных электродов определяется при коэффициенте использования  $\eta_{В.К} = 0,52$ , принятом из табл. 3.6 при  $n = 100$  и  $a/l = 2$ :

$$n = \frac{57,2}{0,52 \cdot 0,959} = 116.$$

10. Производится проверка выполнения условия

$$R_{И} = \frac{R_{В.0} R_{Г1}}{R_{Г1} n \eta_{В} + R_{В.0} \eta_{Г}} = \frac{57,2 \cdot 1,94}{1,94 \cdot 116 \cdot 0,52 + 57,2 \cdot 0,24} = 0,849 \text{ Ом.}$$

$$r_{3М} = \frac{R_{И} \cdot R_e}{R_{И} + R_e} = \frac{0,849 \cdot 1,2}{0,849 + 1,2} = 0,497 < 0,5 \text{ Ом.}$$

Условие выполняется. Окончательно принимается 116 уголков.

Дополнительно к контуру на территории устраивается сетка из продольных полос, расположенных на расстоянии 0,8 - 1 м от оборудования, с поперечными связями через каждые 6 м. Дополнительно для выравнивания

потенциалов у входов и въездов, а также по краям контура прокладываются углубленные полосы. Эти неучтенные горизонтальные электроды уменьшают общее сопротивление заземления, проводимость их идет в запас надежности.

11. Проверяется термическая стойкость полосы  $40 \times 4 \text{ мм}^2$ . Минимальное сечение полосы из условий термической стойкости при к.з. на землю в формуле (4.13) при приведенном времени протекания тока к з.  $t_{\text{п}} = 1,1$  равно:

$$S = 3200 \frac{\sqrt{1,1}}{74} = 45,5 \text{ мм}^2 .$$

Таким образом, полоса  $40 \times 4 \text{ мм}^2$  условию термической стойкости удовлетворяет.

В результате расчетов получилось 116 уголков, что приводит к неоправданному перерасходу проводникового материала и трудозатрат при сооружении заземляющего устройства ПС с небольшой площадью, не имеющих естественных заземлителей, а также при высоких сопротивлениях грунта. Поэтому эта методика для расчета заземления при напряжении 110 кВ и выше не применяется, а применяются методики, описанные далее.

### §4.3. Расчет сложных заземлителей

В методах расчета сложных заземлителей принято положение, согласно которому действительный сложный заземлитель с примерно регулярным размещением проводников (электродов) можно заменить квадратной расчетной моделью при условии равенства их площадей  $S$ , общей длины  $L_{\Gamma}$  горизонтальных проводников и глубины их заложения  $t$ , числа  $n_B$  и длины  $l_B$  вертикальных электродов и глубины  $t$  заложения заземлителя (рис. 4.1). В качестве расчетной принята двухслойная модель неоднородной земли с удельными сопротивлениями слоев – верхнего  $\rho_1$  толщиной  $h_1$  и нижнего  $\rho_2$ . При этом неоднородная двухслойная модель с удельными сопротивлениями  $\rho_1$  и  $\rho_2$  приравнивается однородной с эквивалентным сопротивлением  $\rho_{\text{Э}}$ , при

котором сопротивление или напряжение прикосновения заземлителя имеет ту же величину, что и в реальной неоднородной земле. Таким образом, моделью заземлителя служит квадратная сетка из взаимопересекающихся полос с вертикальными электродами, площадью  $S$ , стороной квадрата  $\sqrt{S}$  и эквивалентным сопротивлением  $\rho_{\Sigma}$ .

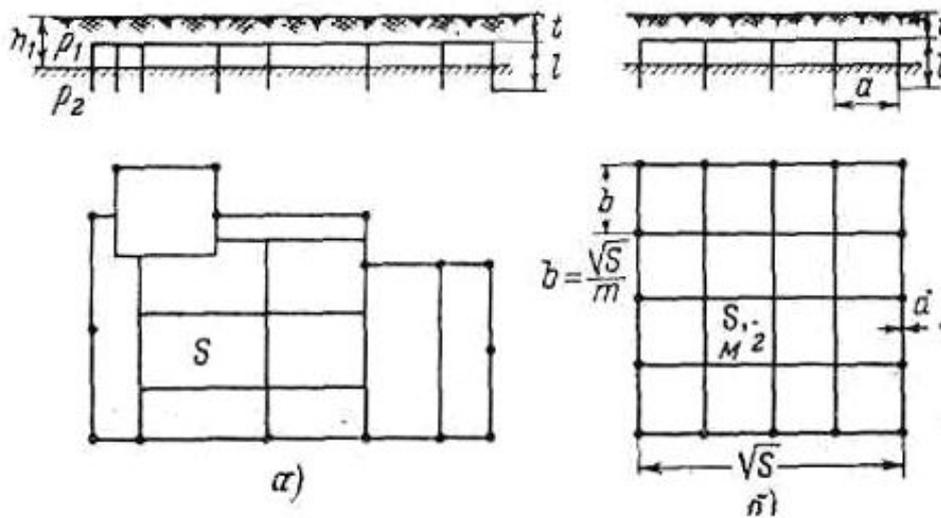


Рис. 4.1. Заземлитель (а) и расчетная модель (б)

Теоретические и экспериментальные исследования, показали следующее.

1) Сопротивление растеканию сложного заземлителя зависит главным образом от размера площади  $S$  заземлителя и удельного сопротивления  $\rho_2$  нижнего слоя земли; при увеличении площади, занимаемой заземлителем, проникновение тока в нижние слои земли увеличивается, и тем самым уменьшается как сопротивление заземлителя, так и влияние промерзания (если нижние слои земли имеют меньшее удельное сопротивление).

2) Стеkanie тока с разных частей сетки происходит неравномерно и зависит от ее конфигурации, размеров ячеек (клеток), места, занимаемого проводником в заземлителе, числа их, глубины заложения и отношения  $\rho_1/\rho_2$ . В частности, плотность тока, стекающего в землю с крайних проводников

сетки, особенно в ее углах, и соответственно значения потенциалов в 1,3 – 1,5 раз выше, чем в средней части заземлителя. Компенсировать это увеличение потенциалов можно заглублением крайних проводников и укладкой в угловых ячейках дополнительных проводников (уменьшением размеров ячейки).

3) Без заметной погрешности можно в расчетах заземлителя принимать, что плотность тока, стекающего в землю в пределах горизонтального элемента (отрезка), одинакова по длине, а вертикального – пропорциональна по длине удельной проводимости слоев земли.

4) Применение вертикальных электродов длиной 5 м и более дает не только снижение сопротивления заземлителя (в особенности при  $\rho_1 \gg \rho_2$ ), но и лучшее выравнивание потенциалов на поверхности земли благодаря уменьшению плотности стекающего тока на проводниках горизонтальной сетки. Вертикальные электроды наилучшим образом используются при расположении их в основном по периметру заземлителя. В этом случае снижается взаимное влияние между горизонтальными и вертикальными электродами, доля тока, стекающего с вертикальных электродов, увеличивается. Поэтому их применение полезно во всех случаях

5) На подстанциях, занимающих большую территорию, горизонтальные электроды, необходимые для заземления оборудования, могут иметь длину, достаточную для получения сопротивления растеканию, соответствующего требованиям /2/, и вместе с тем дать экономию затрат при расчете по напряжению прикосновения. Оптимальное решение может быть найдено на основе технико-экономического сравнения вариантов. При этом затраты на устройство заземлителя определяются по выражению

$$Z = Z_G L_G + Z_B n_B l_B + Z_S (S - S_0) + Z_{II} S_{II} h_{II}, \quad (4.14)$$

где  $Z_G, Z_B, Z_S, Z_{II}$  – соответственно удельные затраты, руб. на единицу длины горизонтальных и вертикальных электродов с учетом земляных работ и монтажа; на единицу площади заземлителя, отводимой сверх необходимой для

размещения оборудования; на единицу объема специальных покрытий (гравийных, бетэловых и др.);

$S$ ,  $S_0$ ,  $S_{II}$  – площади, на которых размещены соответственно сложный заземлитель, заземляемое оборудование и специальные покрытия;

$h_{II}$  – толщина слоя специального покрытия.

#### 4.3.1. Расчет по допустимому сопротивлению заземлителя

Расчет производится в следующем порядке:

1) Определяются основные параметры заземлителя: ток однофазного замыкания  $I_3$  результаты измерений удельных сопротивлений слоев земли  $\rho_1$  и  $\rho_2$  (с учетом состояния земли при измерениях и сезонных коэффициентов), толщина верхнего слоя земли  $h_1$ , сопротивление естественных заземлителей.

2) В соответствии с расположением оборудования на территории установки определяются площадь  $S$ , на которой располагается заземлитель, и расположение продольных и поперечных заземляющих проводников в соответствии с требованиями /2/.

3) Определяется длина заземляющих горизонтальных проводников  $L_T$  по плану установки. Принимается, как правило, наличие вертикальных опорных электродов по контуру заземлителя и намечаются их длина  $l_B$  и число  $n_B$  исходя из отношения расстояния между ними к длине и общая их длина  $L_B = l_B n_B$

4) Определяется необходимое сопротивление двухслойной модели искусственного заземлителя с учетом естественных заземлителей по (4.6). В соответствии с /2/ это сопротивление должно быть не выше 0,5 Ом.

5) Сопротивление заземлителя, состоящего только из горизонтальных электродов, в однородной земле с достаточным приближением может быть определено по формуле

$$R_3 = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L_\Gamma} = 0,444 \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L_\Gamma}, \text{ Ом}, \quad (4.15)$$

где  $r$  – радиус площади ( $S, \text{м}^2$ ), занимаемый заземлителем, м;

$\rho$  – удельное сопротивление земли (расчетное), Ом·м.

Первый член (4.15) дает сопротивление заземлителя в виде сплошной плиты, второй учитывает разницу между сплошной плитой и сеткой из горизонтальных электродов (полос) общей длиной  $L_\Gamma$ , м. Первый член одновременно определяет минимальное сопротивление заземлителя, которое может быть достигнуто на данной площади  $S$  с помощью только горизонтальных электродов.

При сложных заземлителях, содержащих горизонтальные и вертикальные электроды, и с учетом неоднородности удельного сопротивления земли (двухслойная модель) формула (4.15) видоизменяется:

$$R_3 = A \frac{\rho_\varepsilon}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_\varepsilon}{L_\Gamma + L_B}, \text{ Ом}, \quad (4.16)$$

где

$$A = \left( 0,444 - 0,84 \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} \right) \text{ при } 0 \leq \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} \leq 0,1; \quad (4.17)$$

$$A = \left( 0,385 - 0,25 \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} \right) \text{ при } 0,1 \leq \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} \leq 0,5; \quad (4.18)$$

$\rho_\varepsilon$  – эквивалентное удельное сопротивление земли, Ом м, зависящее от параметров электрической структуры земли ( $\rho_1 / \rho_2$  и  $\rho_2$ ) и от конструктивных параметров заземлителя, м: толщины верхнего слоя  $h_1$ , глубины заложения заземлителя  $t$  и длины вертикального электрода  $l_B$ .

б) Определяется эквивалентное удельное сопротивление земли по равенству

$$\rho_\varepsilon = \rho_2 \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha; \quad (4.19)$$

$$\alpha = 0,19 \left( 1 + \lg \frac{4,8 h_1}{l_B} \right) \quad \text{при} \quad 0,1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} < 1; \quad (4.20)$$

$$\alpha = 0,43 \frac{h_1 - t}{l_B} + 0,27 \lg \frac{a}{l_B} + 0,04 \quad \text{при} \quad 1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} \leq 10. \quad (4.21)$$

Приближенно, поскольку промежуточные значения приходится определять путем интерполяции, значение может быть определено из данных табл. 4.3. Таблицей можно пользоваться также для контроля полученных расчетом значений  $\rho_3$ .

Таблица 4.3

Относительное эквивалентное удельное сопротивление  $\rho_3 / \rho_2$  для сеток с вертикальными электродами

$\rho_1 / \rho_2$	$a/l_B$	Относительная толщина слоя с учетом глубины заложения $(h_1 - t)/l_B$						
		0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	0,95
1	1 – 4	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1,02	1,03	1,05	1,1	1,13	1,3	1,4
	2	1,03	1,07	1,1	1,13	1,15	1,32	1,5
	4	1,05	1,17	1,13	1,15	1,2	1,38	1,6
5	1	1,05	1,1	1,15	1,22	1,35	1,86	2,4
	2	1,22	1,26	1,35	1,43	1,54	2,12	2,7
	4	1,33	1,41	1,5	1,65	1,83	2,6	3,5
10	1	1,1	1,2	1,28	1,38	1,62	2,5	3,7
	2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,75	5,5
	4	1,52	1,7	1,88	2,08	2,33	3,52	6,0
0,125	0,5 – 4	0,95	0,9	0,8	0,7	0,62	0,54	0,52
0,25	0,5 – 4	0,97	0,93	0,85	0,78	0,71	0,65	0,64
0,5	0,5 – 4	0,99	0,96	0,92	0,88	0,83	0,79	0,77

Примечание. Для значений  $\rho_1 / \rho_2 < 1$  влияние  $t$  незначительно, и для относительной толщины слоя принято значение  $h_1/l_B$

Приведенные соотношения справедливы при следующих параметрах: сторона  $\sqrt{S} \leq 200$  м; диаметр вертикальных электродов  $d_B$  и эквивалентный диаметр горизонтальных ( $d_T$  или  $b/2$ , где  $b$  – ширина полосы) равны 0,01 – 0,05 м;  $t=0,3 - 2$  м;  $l_B \leq 20$  м;  $a/l_B = 0,5 - 4$ .

Если сопротивление заземлителя превышает требуемое, возможны следующие меры: расширение площади  $S$ , уменьшение отношения  $a/l_B$ , увеличение длины вертикальных электродов. Таким образом, расчет производится по методу постепенного приближения до получения необходимого сопротивления заземлителя.

*Пример 4.3.* Подстанция занимает площадь  $S = 8000$  м<sup>2</sup>, сопротивление естественных заземлителей 2,5 Ом;  $\rho_1 = 500$  Ом·м;  $\rho_2 = 60$  Ом·м;  $h_I = 2$  м;  $l_B = 5$  м;  $t = 0,7$  м.

Необходимое сопротивление заземлителя с учетом естественных заземлителей

$$R_3 \leq \frac{2,5 \cdot 0,5}{2,5 - 0,5} = 0,625 \text{ Ом.}$$

Значение  $R_3$  должно быть найдено по (4.16). По действительному плану установки определяем длину горизонтальных полос с учетом продольных и поперечных  $L_T = 2200$  м. Расчетная модель заземлителя представляет собой квадрат со стороной  $\sqrt{S} \approx 90$  м и взаимопересекающимися полосами. Число ячеек  $m$  по стороне модели равно:

$$m = \frac{L_T}{2\sqrt{S}} - 1 = \frac{2200}{2 \cdot 90} - 1 = 11,2, \text{ принимается } m = 11.$$

Тогда  $L_T = 2\sqrt{S}(m+1) = 2 \cdot 90 \cdot 12 = 2160$  м.

Длина стороны ячейки

$$b = \frac{90}{11} = 8,2, \text{ м.}$$

Принимается отношение  $a/l_B=2$ . Тогда число вертикальных электродов, если расположить их по периметру заземлителя (модели):

$$n_B = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{2l_B} = \frac{90 \cdot 4}{2 \cdot 5} = 36;$$

$$L_B = 5 \cdot 36 = 180 \text{ м.}$$

Относительная глубина погружения вертикальных электродов

$$\frac{l_B + t}{\sqrt{S}} = \frac{5 + 0,7}{90} = 0,0633 < 0,1,$$

т. е. влияние вертикальных заземлителей мал, поэтому согласно (4.17)

$$A = 0,444 - 0,84 \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} = 0,444 - 0,84 \cdot 0,0633 = 0,391.$$

Согласно (4.21)

$$\alpha = 0,43 \frac{h_1 - t}{l_B} + 0,271 \lg \frac{a}{l_B} + 0,04 = 0,43 \frac{2 - 0,7}{5} + 0,271 \lg 2 + 0,04 = 0,233$$

Согласно (4.19)

$$\rho_{\text{э}} = \rho_2 \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{\alpha} = 60 \cdot \left( \frac{500}{60} \right)^{0,233} = 60 N;$$

$$\lg N = 0,233 \cdot \lg 8,35 = 0,215; \quad N = 1,64;$$

$$\rho_{\text{э}} = 60 \cdot 1,64 = 98,5 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Согласно (4.16)

$$R_3 = A \frac{\rho_{\text{э}}}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_{\text{э}}}{L_{\Gamma} + L_B} = 0,391 \frac{98,5}{90} + \frac{98,5}{2160 + 180} = 0,470 \text{ Ом.}$$

т. е. имеется запас против требуемых 0,625 Ом. В данном случае можно было бы уменьшить число вертикальных электродов и пересчитать сопротивление.

#### 4.3.2. Расчет по допустимому напряжению прикосновения

Заземляющее устройство, которое выполняется с соблюдением требований, предъявляемых к напряжению прикосновения, должно обеспечивать в любое время года при стекании с него тока замыкания на землю

значение напряжения прикосновения, не превышающих значений, приведенных в табл. 2.1.

За расчетную длительность воздействия  $\phi_B$  принимается, с:

$$\phi_B = t_{p.з} + t_{o.в}. \quad (4.22)$$

Наибольшее возможное напряжение прикосновения на территории, занятой заземлителем, определяется по формуле

$$U_{пр.макс} = I_3 R_3 k_{II} = U_3 k_{II}, \text{ В} \quad (4.23)$$

где  $R_3$  - сопротивление заземлителя, определяемое по методу, приведенному в п. 4.3.1;

$I_3$  - ток однофазного замыкания, стекающий в землю через основной и естественные заземлители;

$k_{II}$  - коэффициент напряжения прикосновения.

Допустимые напряжения прикосновения должны соответствовать требованиям, причем в качестве расчетного принято напряжение на теле человека, стоящего в центре ячейки (клетки) сетки и прикасающегося прямо или через какой-либо предмет к оборудованию, оказавшемуся под напряжением. В данном случае не требуется соблюдение требований о расположении продольных и поперечных полос заземлителя, какие предъявлялись к заземлителю, рассчитываемому по сопротивлению 0,5 Ом. Расположение этих полос и расстояние между ними определяются лишь условиями, необходимыми для достижения допустимых величин напряжений прикосновения (но не более 32 м между соседними продольными и поперечными проводниками). Это вызывает определенные трудности в расчете, так как приходится принимать предварительно приближенную длину горизонтальных проводников и получать окончательное решение методом постепенного приближения. При некотором навыке эта трудность успешно преодолевается.

Можно рекомендовать при заземлителях малой площади в первом варианте расчета принимать такое же число и расположение горизонтальных

проводников, как и при расчете по сопротивлению 0,5 Ом, а при большой площади ограничиться в первом варианте лишь проводниками, требующимися для заземления оборудования. При этом значение эквивалентного сопротивления  $\rho_{\Sigma}$  земли можно оставлять неизменным во всех вариантах.

Для сложных заземлителей из горизонтальных и вертикальных электродов значение коэффициента определяется по равенству

$$k_{\Pi} = \frac{M \beta}{\left( \frac{l_B L_{\Gamma}}{a \sqrt{S}} \right)^{0,45}}, \quad (4.24)$$

где параметр М зависит от отношения  $\rho_1 / \rho_2$ :

$\rho_1 / \rho_2$	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10
М	0,36	0,50	0,62	0,69	0,72	0,75	0,77	0,79	0,80	0,82

Равенство (4.24) без коэффициента  $\beta$  дает значение  $k_{\Pi}$  при напряжении между двумя точками, которых может одновременно коснуться человек (т. е. до прикосновения человека к этим точкам).

Коэффициент  $\beta$  дает отношение сопротивления тела человека  $R_{\text{ч}}$  к сумме сопротивлений тела человека и сопротивления растеканию тока с ног человека (после прикосновения). Принимая сопротивление  $R_{\text{ч}} = 1000$  Ом, получаем:

$$\beta = \frac{R_{\text{ч}}}{R_{\text{ч}} + r_{\Pi}} = \frac{1000}{1000 + r_{\Pi}}. \quad (4.25)$$

Значение  $r_{\Pi}$  для случая прикосновения рука - ноги может быть приближенно принято равным  $1,5 \rho_{\text{в.с}}$ , где  $\rho_{\text{в.с}}$  - удельное сопротивление верхнего слоя земли.

Область применения метода:  $l_B = 5-20$  м;  $a/l_B = 1-5$ ;  $t = 0,5-0,8$  м;  $L_{\Gamma} / \sqrt{S} = 4-30$  м;  $\sqrt{S} = 20-150$  м.

*Пример 4.4.*  $S=40 \times 60$  м<sup>2</sup>;  $\rho_1=480$  Ом·м (с учетом промерзания);  $\rho_2=220$  Ом·м;  $h_1 = 3$  м,  $t = 0,7$  м;  $L_{\Gamma} = 950$  м;  $l_B = 5$  м; время воздействия  $\phi_B = 0,2$  с. В

соответствии с табл. 2.1  $U_{\text{пр.макс}} = 400$  В. Естественных заземлителей нет. Определяется значение  $R_3$  при указанных выше данных, принимая отношение  $a/l_B = 1$ .

Расчетная квадратная модель заземлителя имеет следующие параметры

$$\sqrt{S} = \sqrt{2400} = 49 \text{ м.}$$

$$m = \frac{L_r}{2\sqrt{S}} - 1 = \frac{950}{2 \cdot 49} - 1 = 8,7, \text{ принимается } m = 9.$$

Тогда  $L_r = 2\sqrt{S}(m+1) = 980 \text{ м.}$

$$b = \frac{49}{9} = 5,45 \text{ м или } \approx 5,5 \text{ м;}$$

$$n_B = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{1 \cdot l_B} = \frac{49 \cdot 4}{1 \cdot 5} = 39;$$

$$L_B = l_B \cdot n_B = 5 \cdot 39 = 195 \text{ м;}$$

$$\frac{l_B + t}{\sqrt{S}} = \frac{5 + 0,7}{49} = 0,116 > 0,1,$$

Согласно (4.18)

$$A = 0,385 - 0,25 \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} = 0,385 - 0,25 \cdot 0,116 = 0,356;$$

$$\frac{l_B}{\sqrt{S}} = \frac{5}{49} = 0,102.$$

Согласно (4.21)

$$\alpha = 0,43 \frac{h_1 - t}{l_B} + 0,27 \lg \frac{a}{l_B} + 0,04 = 0,43 \frac{3 - 0,7}{5} + 0,27 \lg 1 + 0,04 = 0,238;$$

$$\rho_{\text{э}} = \rho_2 \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{\alpha} = 200 \cdot \left( \frac{480}{200} \right)^{0,238} = 200 N;$$

$$\lg N = 0,238 \cdot \lg 2,4 = 0,0905; \quad N = 1,232;$$

$$\rho_{\text{э}} = 200 \cdot 1,232 = 247 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Согласно (4.6)

$$R_3 = A \frac{\rho_{\text{э}}}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_{\text{э}}}{L_r + L_B} = 0,356 \frac{247}{49} + \frac{247}{980 + 195} = 2,0 \text{ Ом.}$$

Рассмотрим, какие напряжения прикосновения могут быть достигнуты при полученных параметрах заземлителя.

Согласно (4.24) при  $a/l_B=1$

$$\kappa_{\Pi} = \frac{M \beta}{\left(\frac{l_B L_{\Gamma}}{a \sqrt{S}}\right)^{0,45}} = \frac{M \beta}{\left(\frac{950}{1,49}\right)^{0,45}} = \frac{M \beta}{19,4^{0,45}};$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{480}{200} = 2,4.$$

При  $\rho_1/\rho_2 = 2,4$  находим  $M \approx 0,65$ . Согласно (4.25)

$$\beta = \frac{1000}{1000 + r_{\Pi}},$$

где  $r_{\Pi} = 1,5\rho_{в.с} = 1,5 \cdot 480 = 720$  Ом;

$$\beta = \frac{1000}{1720} = 0,582;$$

$$\lg N = 0,45 \lg 19,4 = 0,45 \cdot 1,288 = 0,58; \quad N = 3,8;$$

$$\kappa_{\Pi} = \frac{0,65 \cdot 0,582}{3,8} = 0,1.$$

Согласно (4.23), подставляя полученные и заданные значения  $U_{\text{пр.макс}}$ ,  $R_3$  и  $\kappa_{\Pi}$  приходим к выводу, что получить при этих параметрах допустимое напряжение прикосновения 400 В можно при токах однофазного замыкания не выше, чем

$$I_3 \leq \frac{U_{\text{пр.макс}}}{R_3 \kappa_{\Pi}} = \frac{400}{2 \cdot 0,1} = 2000 \text{ А.}$$

Если ток замыкания превышает 2000 А, можно пойти на увеличение числа (длины) горизонтальных электродов путем расширения площади заземлителя или, если это невозможно, выполнить сетку более густой, хотя в данном случае она и без того достаточно густа ( $m^2=81$ ,  $b=5,5$ ), приняв меры к снижению крутого спада потенциала за пределами заземлителя.

Во всяком случае, приходится считаться с тем, что, несмотря на преимущества расчета по напряжению прикосновения с точки зрения обеспечения безопасности, достижение нормированных Правилами напряжений прикосновения при подстанциях малой площади, повышенных

значениях удельного сопротивления земли и тока однофазного замыкания представляет значительные трудности. Преодолеть эти трудности можно, если выполнить заземлитель в виде сетки, близкой к сплошной плите. Другой путь — засыпка территории подстанции гравием ( $\rho_{в.с} = 6000 - 8000$  Ом·м при толщине слоя 15 - 20 см) и соответственно значительное значений  $\rho_{в.с}$  (верхнего слоя земли) и тем самым снижение коэффициента  $\beta$  в равенствах (4.25) и (4.24). На подстанциях, занимающих большую площадь, выполнение заземлителей исходя из допустимых напряжений прикосновения может дать экономию металла, особенно при достаточно низких значениях  $\rho_2$ , что видно из примера 4.5.

*Пример 4.5.*  $S=120 \times 120$  м<sup>2</sup>;  $\rho_1=500$  Ом·м (с учетом промерзания);  $\rho_2=50$  Ом·м;  $h_1=3$  м,  $t=0,7$  м;  $L_\Gamma=1800$  м;  $l_B=10$  м; время воздействия  $\phi_B=0,2$  с,  $I_3=10$  кА; сопротивления естественных заземлителей 2 Ом. Обозначения те же, что в примерах 4.2 и 4.3.

$$m = \frac{L_\Gamma}{2\sqrt{S}} - 1 = \frac{1800}{2 \cdot 120} - 1 = 6,5; \text{ принимается } m = 7.$$

Тогда действительное значение  $L_\Gamma$  равно:

$$L_\Gamma = 2\sqrt{S}(m+1) = 8 \cdot 120 \cdot 8 = 1920 \text{ м};$$

$$b = \frac{120}{7} = 17; \text{ принимается } a/l_B = 1;$$

$$n_B = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{1 \cdot l_B} = \frac{120 \cdot 4}{1 \cdot 10} = 48;$$

При большой площади подстанции целесообразно выполнить в середине площади дополнительный ряд вертикальных электродов с их числом

$$\frac{\sqrt{S}}{1 \cdot l_B} = \frac{120}{1 \cdot 10} = 12;$$

Тогда

$$L_B = l_B \cdot n_B = 10 \cdot 60 = 600 \text{ м};$$

$$\frac{l_B + t}{\sqrt{S}} = \frac{10 + 0,7}{120} = 0,0895 < 0,1.$$

Согласно (4.17)

$$A = \left( 0,444 - 0,84 \frac{t_B + t}{\sqrt{S}} \right) = 0,444 - 0,84 \cdot 0,0895 = 0,369;$$

$$\frac{t_B}{\sqrt{S}} = \frac{10}{120} = 0,0834.$$

Согласно (4.20)

$$\alpha = 0,19 \left( 1 + \lg \frac{4,8 h_1}{l_3} \right) = 0,19 \cdot 1,58 = 0,3.$$

Согласно (4.19)

$$\rho_3 = \rho_2 \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{0,3} = \rho_2 N;$$

$$\lg N = 0,3 \cdot \lg \frac{500}{50} = 0,3; \quad N = 2;$$

$$\rho_3 = 50 \cdot 2 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

$$R_3 = 0,369 \frac{100}{120} + \frac{100}{1920 + 600} = 0,347 \text{ Ом},$$

а с учетом естественных заземлителей

$$R_3 = \frac{0,347 \cdot 2}{0,347 + 2} = 0,295 \text{ Ом}.$$

Из расчетов следует, что при числе ячеек (клеток)  $m^2 = 49$  и при сторонах ячеек 17x17 м сопротивление заземлителя оказалось ниже 0,5 Ом при относительно малом расходе металла, но считать, что заземлитель удовлетворяет требованиям Правил ( $R_3 = 0,5 \text{ Ом}$ ), нельзя, так как не удовлетворено требование Правил о расстоянии между продольными и поперечными полосами, обеспечивающее выравнивание потенциала. Это может быть допущено, если напряжения прикосновения не превысят допустимой величины, т. е. если в данном случае согласно (4.23)

$$U_{\text{пр.макс}} = I_3 R_3 k_{\text{II}} \leq 400 \text{ В.}$$

Согласно (4.24)

$$k_{\text{II}} = \frac{M \beta}{\left( \frac{l_B L_{\Gamma}}{a \sqrt{S}} \right)^{0,45}},$$

При  $\rho_1 / \rho_2 = 10$  находим  $M = 0,62$ .

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1,5 \rho_{\text{в.с}}} = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 500} = 0,572;$$

$$\left( \frac{l_B L_{\Gamma}}{a \sqrt{S}} \right)^{0,45} = \left( \frac{1920}{1 \cdot 120} \right)^{0,45} = 16^{0,45};$$

$$\lg N = 0,45 \lg 16 = 0,45 \cdot 1,204 = 0,542; \quad N = 3,48;$$

$$k_{\text{II}} = \frac{0,82 \cdot 0,572}{3,48} = 0,134;$$

$$U_{\text{пр.макс}} = 10000 \cdot 0,295 \cdot 0,134 = 397 \text{ В,}$$

т.е. требование /2/ удовлетворяется.

*Пример 4.6.* Рассчитать заземляющее устройство для КТП 110/10 кВ площадью  $S=12 \times 20 \text{ м}^2$ ;  $\rho_1=500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  (с учетом промерзания);  $\rho_2=60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $h_1=2 \text{ м}$ ,  $t=0,7 \text{ м}$ ;  $l_B=5 \text{ м}$ ;  $t_{\text{р.з}}=0,12 \text{ с}$ ;  $t_{\text{о.в}}=0,08 \text{ с}$ , ток замыкания на землю при однофазном к.з. на рассматриваемой ПС  $I_3=1,9 \text{ кА}$ . Естественных заземлителей нет. Обозначения те же, что в примерах 4.2 и 4.3.

Для  $\phi_{\text{в}}=0,12+0,08=0,2 \text{ с}$  в соответствии с табл. 2.1  $U_{\text{пр.макс}}=400 \text{ В}$ .

$$\text{По выражению (4.24)} \quad k_{\text{II}} = \frac{0,806 \cdot 0,57}{\left( \frac{5 \cdot 125}{5 \sqrt{12 \cdot 20}} \right)^{0,45}} = 0,18;$$

где  $M=0,806$  при  $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{500}{60} = 8,3$ .

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1,5 \rho_{\text{в.с}}} = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 500} = 0,572;$$

$L_{\Gamma} = 125$  м определяется по плану, приведенному на рис. 4.2.

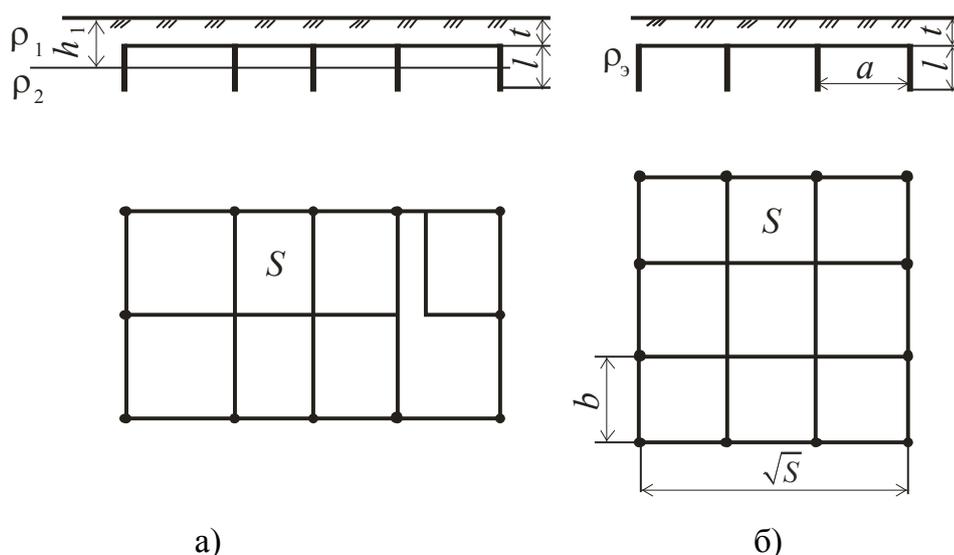


Рис. 4.2. К расчету сложных заземлителей

а – заземляющее устройство подстанции; б – расчетная модель

По (4.23)  $U_3 = \frac{U_{\text{пр.макс}}}{k_{\text{п}}} = \frac{400}{0,18} = 2222$  В, что находится в пределах

допустимого (меньше 10 кВ). Тогда  $R_{3,\text{дон}} = \frac{U_3}{I_3} = \frac{2222}{1900} = 1,23$  Ом.

Далее производится преобразование действительного плана заземляющего устройства (рис. 4.2 а) в расчетную квадратную модель (рис. 4.2 б) со стороной

$$\sqrt{S} = \sqrt{12 \cdot 20} = 15,5 \text{ м.}$$

Число ячеек по стороне квадрата

$$m = \frac{L_{\Gamma}}{2\sqrt{S}} - 1 = \frac{125}{2 \cdot 15,5} - 1 = 3,03; \text{ принимается } m = 3.$$

Тогда действительное значение длины полос в расчетной модели  $L_{\Gamma}$  равно:

$$L_{\Gamma} = 2\sqrt{S}(m+1) = 2 \cdot 15,5 \cdot 4 = 124 \text{ м;}$$

Длина сторон ячейки  $b = \frac{15,5}{3} = 5,17$  м. Тогда число вертикальных

заземлителей по периметру контура при условии  $a/l_{\text{в}}=1$

$$n_B = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{1 \cdot l_B} = \frac{15,5 \cdot 4}{1 \cdot 5} = 12,4; \text{ принимается } n_B = 12$$

Общая длина вертикальных заземлителей

$$L_B = l_B \cdot n_B = 5 \cdot 12 = 60 \text{ м};$$

Относительная глубина  $\frac{l_B + t}{\sqrt{S}} = \frac{5 + 0,7}{15,5} = 0,368 > 0,1$ , тогда по (4.18)

$$A = 0,385 - 0,25 \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} = 0,385 - 0,25 \cdot \frac{5 + 0,7}{15,5} = 0,293.$$

По табл. 4.3 для  $\rho_1/\rho_2 = 8,3$ ;  $a/l_B = 1$ ;

$$\frac{h_1 - t}{l_B} = \frac{2 - 0,7}{5} = 0,26$$

определяется  $\rho_{\text{э}}/\rho_2 = 1,4$ , тогда  $\rho_{\text{э}} = 1,4 \rho_2 = 1,4 \cdot 60 = 84 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

По (4.16)

$$R_{\text{з}} = A \frac{\rho_{\text{э}}}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_{\text{э}}}{L_{\Gamma} + L_B} = 0,293 \frac{84}{15,5} + \frac{84}{124 + 60} = 2,044 \text{ Ом},$$

что больше  $R_{\text{з.дон}} = 1,23 \text{ Ом}$ .

Определяется напряжение прикосновения:

$$U_{\text{пр.макс}} = I_{\text{з}} R_{\text{з.дон}} k_{\Pi} = 0,18 \cdot 1900 \cdot 2,044 = 699 \text{ В},$$

что больше допустимого значения 400 В.

Необходимо принять меры для снижения  $U_{\text{пр.макс}}$  путем расширения заземляющего устройства за территорию подстанции или путем использования естественных заземлителей.

Допустим, что на подстанции могут быть использованы естественные заземлители системы трос - опоры линии 110 кВ общим сопротивлением 2 Ом.

Тогда необходимое сопротивление искусственных заземлителей по (4.6)

$$R_{\text{И}} = \frac{R_e r_{\text{зМ}}}{R_e - r_{\text{зМ}}} = \frac{2 \cdot 1,23}{2 - 1,23} = 3,19 \text{ Ом}.$$

Таким образом, сопротивление заземляющего контура подстанции удовлетворяет требованию

$$R_3 < R_{II}.$$

Общее сопротивление заземляющего устройства подстанции с учетом естественных заземлителей

$$R'_3 = \frac{R_3 R_e}{R_3 + R_e} = \frac{2,044 \cdot 2}{2,044 + 2} = 1,01 \quad \text{Ом},$$

тогда напряжение прикосновения

$$U_{\text{пр.макс}} = I_3 R'_3 k_{\Pi} = 0,18 \cdot 1900 \cdot 1,01 = 345 \text{ В},$$

что меньше допустимого значения 400 В.

Возможен другой путь уменьшения  $U_{\text{пр.макс}}$ , для этого можно применить подсыпку слоя гравия толщиной 0,2 м по всей территории подстанции. Удельное сопротивление верхнего слоя почвы (гравия) в этом случае будет  $\rho_{B.C} = 3000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , тогда

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1,5 \rho_{B.C}} = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 3000} = 0,18;$$

$$k_{\Pi} = \frac{0,806 \cdot 0,18}{\left( \frac{5 \cdot 125}{5 \sqrt{12 \cdot 20}} \right)^{0,45}} = 0,057;$$

Подсыпка гравием не влияет на растекание тока с заземляющего устройства, так как глубина заложения заземлителей 0,7 м больше толщины слоя гравия, поэтому соотношение  $\rho_1/\rho_2$  и величина  $M$  остаются неизменными.

Из (4.23) 
$$U_3 = \frac{U_{\text{пр.макс}}}{k_{\Pi}} = \frac{400}{0,057} = 7017 \text{ В}.$$

По (4.1)

$$R_{3.\text{дон}} = \frac{7017}{1900} = 3,69 \quad \text{Ом},$$

что меньше  $R_3 = 2,044 \text{ Ом}$ .

Напряжение прикосновения

$$U_{\text{пр.макс}} = I_3 R_3 k_{\Pi} = 0,057 \cdot 1900 \cdot 2,044 = 221 \text{ В},$$

что меньше допустимого.

Из расчета видно, как эффективна подсыпка гравием на территории ОРУ.

Максимальный допустимый ток однофазного к.з. на данной подстанции:

$$I_{з.макс} = \frac{U_{пр.макс}}{R_3 \kappa_{п}} = \frac{400}{2,044 \cdot 0,057} = 3433 \text{ А.}$$

При больших токах к.з. необходимо снижение величины  $R_3$  за счет утащания сетки полос или дополнительных вертикальных электродов.

#### §4.4. Выносные заземлители

В местах с высоким удельным сопротивлением земли экономически приемлемое решение может дать устройство выносных заземлителей в хорошо проводящих слоях земли, невымерзающих озерах и болотах, реках, в море. Соединение заземлителя с установкой осуществляется воздушной или кабельной линией.

При расположении электродов в воде они могут забиваться в дно либо укладываться на дно в виде сетки из медных проводников или из полосовой стали (в море – оцинкованной) с расстоянием 10 - 15 м между полосами для уменьшения взаимного влияния. При укладке электродов на дно целесообразно помещать их в местах, где можно ожидать засасывания речным грунтом, если он имеет значительно меньшее удельное сопротивление, чем вода.

Устройство выносных заземлителей не исключает необходимости устройства непосредственно на территории установки местного заземлителя, который в этом случае способствует выравниванию потенциалов. Расчет выносных заземлителей усложняется, поскольку требуется учитывать активное и реактивное сопротивления линий связи между защищаемой установкой и местом расположения заземлителя. Полное сопротивление линии связи следует определять с учетом влияния земли аналогично тому, как это было принято в § 3.3, по равенству (3.15).

*Пример 4.6.* В установке 6/0,4 кВ расчетный ток замыкания на землю 40 А. Необходимое сопротивление выносного заземляющего устройства

$$z = \frac{125}{40} = 3,12 \text{ Ом.}$$

Удельное сопротивление земли в месте расположения заземлителя 100 Ом·м. Соединительный проводник выполнен в виде воздушной линии. Требуется определить сопротивление растеканию выносного заземлителя, расположенного от установки на расстоянии 0,5 км.

Выбирается предварительно в качестве соединительного проводника стальной провод ПС-70, диаметр провода 11,5 мм. При токе 40 А активное сопротивление провода при длине 0,5 км равно:

$$r_{np} = 0,5 \cdot 1,91 = 0,955 \text{ Ом.}$$

Внутреннее реактивное сопротивление провода

$$x'' = 0,5 \cdot 0,76 = 0,38 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление с учетом сопротивления земли (0,05 Ом/км)

$$r = 0,955 + 0,05 \cdot 0,5 = 0,98 \text{ Ом.}$$

Общее реактивное сопротивление будет равно:

$$x = 0,38 + 0,5 \cdot 0,145 \lg \frac{0,178}{5,75 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2 \sqrt{50 \cdot \frac{10^{-2}}{100} \cdot 10^{-9}}} = 0,38 +$$
$$+ 0,0725 \lg \frac{0,178}{0,575 \cdot 2,23 \cdot 10^{-6}} = 0,753 \text{ см.}$$

Полное сопротивление соединительного проводника

$$z = \sqrt{0,98^2 + 0,753^2} = 1,24 \text{ Ом.}$$

Таким образом, сопротивление выносного заземлителя должно быть равно:

$$3,12 - 1,24 = 1,88 \text{ Ом.}$$

Если проводником служит трехжильный кабель, его сопротивление определяется аналогично, а радиус  $r_0$  может быть приближенно принят равным (поскольку используются все три жилы):

$$r_0 \approx \frac{1}{2}(\sqrt[3]{a} + d), \quad (4.25)$$

где  $a$  - расстояние между центрами жил, см;  $d$  - диаметр жилы, см.

Так как в кабеле проходит нескомпенсированный ток, то при наличии брони в схеме возникают дополнительные активное и реактивное сопротивления, обусловленные переменным магнитным потоком в броне. Существенное значение может иметь реактивное сопротивление  $x_{don}$ , которое зависит от величины нескомпенсированного тока. Приближенно можно принимать следующие значения  $x_{don}$ : при токе до 200 А 1 Ом/км, при токах 750 А и больших  $\approx 0,4$  Ом/км.

Значение  $x_{don}$  учитывается в расчете. Сечение соединительного кабеля при больших токах замыкания на землю должно быть проверено на термическую устойчивость. Жилы соединительного кабеля должны быть оконцованы наваренными наконечниками. Жилы и оболочка кабеля должны быть присоединены болтами к заземлителю подстанции в одном из его узлов, места присоединения и контакты покрыты смазкой. Для возможности контроля в узле присоединения целесообразно устроить небольшой колодец с крышкой. Место, где расположен выносной заземлитель, должно быть ограждено, а ограда должна отстоять от краев контура на 3 м. При расположении заземлителя в реке, озере, море прилегающее место на берегу следует оградить и установить надписи с запрещением купаться, стирать белье и т. п.

## ГЛАВА 5. ПРОВЕРКА, ИСПЫТАНИЯ И СДАЧА РАБОТ

При сдаче-приемке в эксплуатацию смонтированных заземляющих устройств должна быть предъявлена следующая техническая документация на каждый отдельно стоящий объект:

а) паспорт, содержащий схему заземления, а также основные технические данные о результатах проверки состояния заземляющего устройства, характере ремонтов и изменениях, внесённых в данное устройство;

б) протоколы приемо-сдаточных испытаний. Схема заземления в паспорте должна быть в виде исполнительных чертежей проекта заземляющего устройства с изменениями, внесёнными в процессе строительства.

Данные о результатах проверки состояния заземляющего устройства в паспорте должны быть в виде актов освидетельствования скрытых работ по монтажу заземляющих устройств и присоединений к естественным заземляющим устройствам, а также актов осмотра и проверки состояния открыто проложенных заземляющих проводников.

Параметры заземляющего устройства следует определять в соответствии со следующими рекомендациями.

### §5.1. Измерение электрического сопротивления земли

Удельное электрическое сопротивление земли по глубине определяется методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) при помощи измерителя сопротивления заземления МС-08 (07) или М-416 (рис. 5.1), а также ИКС-1 или ИКС-50. К токовым электродам АВ подключаются токовые выводы прибора; напряжение между потенциальными электродами подается на потенциальные выводы прибора. По измеренному значению сопротивления  $c_{изм}$  определяется кажущееся удельное сопротивление:

$$c_k = kc_{изм}, \quad (5.1)$$

где  $k$  - коэффициент, зависящий от расстояния между электродами измерительной установки.

При равных расстояниях между электродами, т.е. при  $a = AB/3$ ,

$$k = 2\pi a, \quad (5.2)$$

где  $a$  принимается равным двойной глубине слоя грунта, до которого производится измерение  $\rho$ .

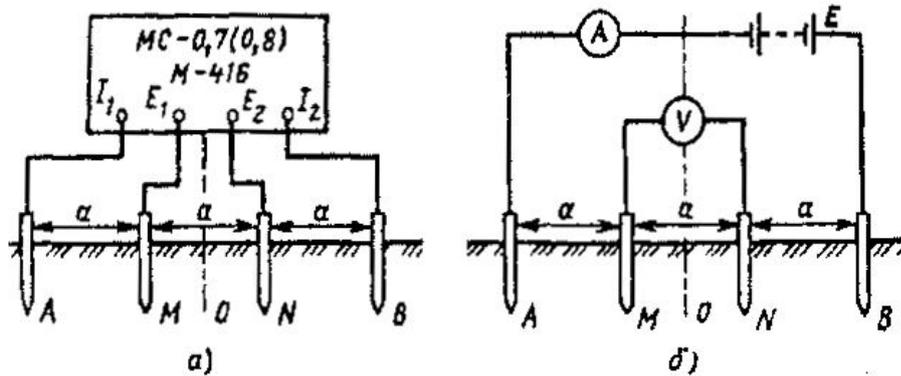


Рис. 5.1. Схема для определения удельного сопротивления грунта:

$a$  - измерителем заземления МС - 08 (М - 416);  $b$  - по методу амперметра-вольтметра

При исследовании изменения сопротивления грунта по глубине целесообразно провести 10 - 15 измерений при различных расстояниях между электродами. Центр установки  $O$  при этом остается неизменным. Трассу для измерений нужно выбирать на расстоянии 5 - 10 м от металлических коммуникаций.

Значения  $k$  для соответствующих расстояний между электродами при проведении измерений с разносом электродов следующие:

$AB, м$ .....	20	30	45	60	90	120	150	200
$MN, м$ .....	6,6	10	15	20	30	40	50	66
$k$ .....	42,1	62,8	94,2	125,6	188,4	251,2	314	421

Рассчитанные по формуле (5.1) значения кажущегося удельного сопротивления грунта следует представить в виде графика, называемого кривой ВЭЗ, на логарифмической бумаге с логарифмической единицей, равной 6,25 см.

По оси ординат откладывают значения  $c_k$ , а по оси абсцисс -  $0,5AB$  (в метрах). Для определения параметров двухслойного грунта (удельного сопротивления первого и второго слоев  $c_1, c_2$  и мощности верхнего слоя  $h_1$ ) пользуются расчетными кривыми - палетками (рис. 5.2). Полученную экспериментальную кривую калькируют вместе с осями координат и накладывают на набор палеток. Перемещая кальку по набору палеток, добиваются наилучшего совпадения кривой с одной из теоретических кривых. Оси координат при этом должны оставаться параллельными. Затем, отсчитав ординату эмпирической кривой  $c'_k$ , отсекаемую осью абсцисс палетки  $l$ , получают удельное сопротивление верхнего слоя грунта.

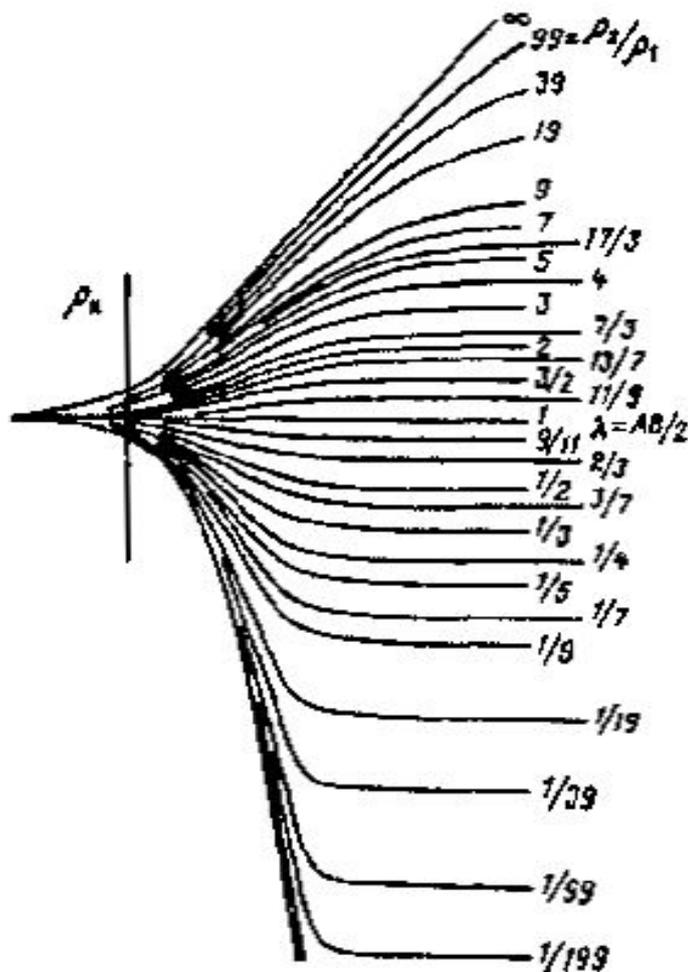


Рис. 5.2. Палетка ВЭЗ

Ось ординат палетки  $c_k$  отсекает на оси абсцисс эмпирической кривой  $l'$  отрезок  $h_1$  определяющий глубину границы раздела слоев, т.е. толщину

верхнего слоя. Сопротивление второго слоя определяется асимптотой эмпирической кривой при больших значениях  $AB/2$ .

На рис. 5.3 приведен пример определения параметров грунта. В рассматриваемом примере экспериментальная кривая ВЭЗ (штриховая линия 2) совпадает с палеткой  $c_1/c_2 = 1/4$ . Палетка построена в осях координат:  $c_k$  - ось ординат;  $l$  - ось абсцисс; оси координат экспериментальной кривой  $c'_k$  и  $l'$ . При совмещении кривой ВЭЗ с палеткой ось ординат палетки  $c_k$  отсекает на оси абсцисс экспериментальной кривой  $l'$  отрезок, определяющий толщину верхнего слоя  $h_1 = 4$  м. Ось абсцисс палетки 1 отсекает на оси ординат эмпирической кривой  $c'_k$  ординату  $c'_k$ , определяющую сопротивление верхнего слоя грунта. Для рассматриваемого примера  $c_1 = 500$  Ом·м. Сопротивление второго слоя  $c_2 = c_1/4 = 125$  Ом·м.

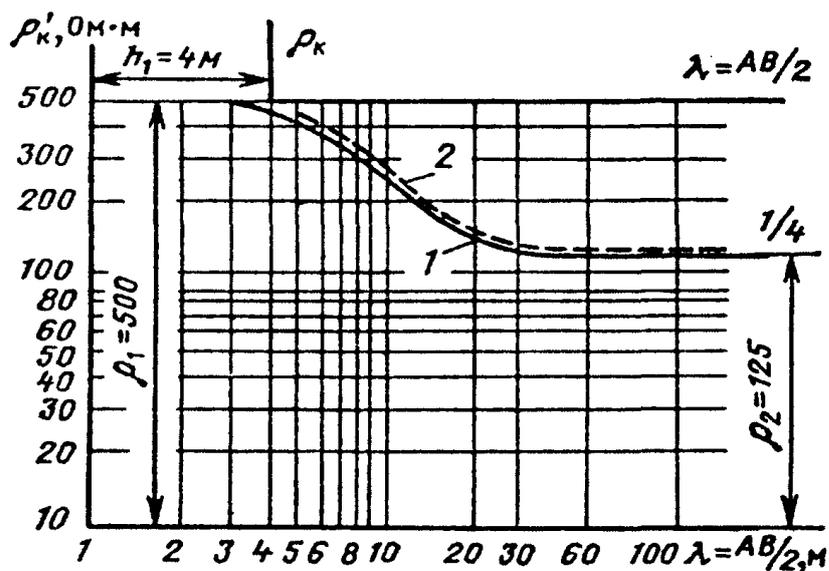


Рис. 5.3. Определение параметров электрической структуры грунта:

1 - кривая палетки ВЭЗ; 2 - экспериментальная кривая ВЭЗ

## §5.2. Измерение сопротивления заземляющих устройств

*Измерение сопротивления заземлителей.* Методы измерения электрических характеристик заземляющих устройств должны обеспечивать следующие основные требования: ошибки при измерении не должны превышать 10 %; малая трудоемкость измерения; электробезопасность персонала, выполняющего измерения, а также лиц, случайно прикасающихся во время измерения к заземленным частям электроустановок. Приборы должны обеспечивать максимально возможную помехозащищенность.

Экспериментальное определение сопротивления заземляющего устройства сводится к одновременному измерению напряжения на нем и стекающего в землю тока. Для этого используют так называемую схему амперметра-вольтметра.

Измерение сопротивления растеканию одиночных заземлителей производят по схемам, указанным в табл. 5.1.

*Измерение сопротивления заземляющего устройства.* Сопротивление заземляющих устройств следует измерять по общепринятому методу амперметра- вольтметра (рис. 5.4), при этом используется измеритель заземления со шкалой, градуированной непосредственно в омах. Можно также использовать комплект геофизической аппаратуры ИКС-50.

Точность измерения зависит, в основном, от правильности расположения измерительных электродов: токового  $T$  и потенциального  $П$ . При различных геоэлектрических разрезах грунта (различных соотношениях удельных сопротивлений поверхностных и подстилающих слоев грунта) близкое к действительному значение сопротивления может быть получено при различном соотношении расстояний от испытуемого заземлителя до потенциального и до токовую электродов.

Схемы измерения сопротивления растеканию одиночных заземлителей

Измерение сопротивления растеканию	Схема измерения	Приборы	Особенности измерения
Одиночные вертикальные заземлители		Измерители заземления М-416, МС-08, МС-07, Ф4103	Расстояние между электродами принимается: а) при $l \leq 6$ м $r_{3Т} = 40$ м; $r_{3П} = 25$ м; б) при $l > 6$ м $r_{3Т} > 6l$ , $r_{3П} = 0,5r_{3Т}$
Одиночные горизонтальные полосы		То же	а) при $L > 40$ м $r_{3Т} = 24$ м; $r_{3П} = 4$ м; б) при $10 \text{ м} \leq L \leq 40$ м $r_{3Т} \geq 80$ м; $r_{3П} = 0,5r_{3Т}$ в) при $L < 10$ м $r_{3Т} = 40$ м; $r_{3П} = 20$ м

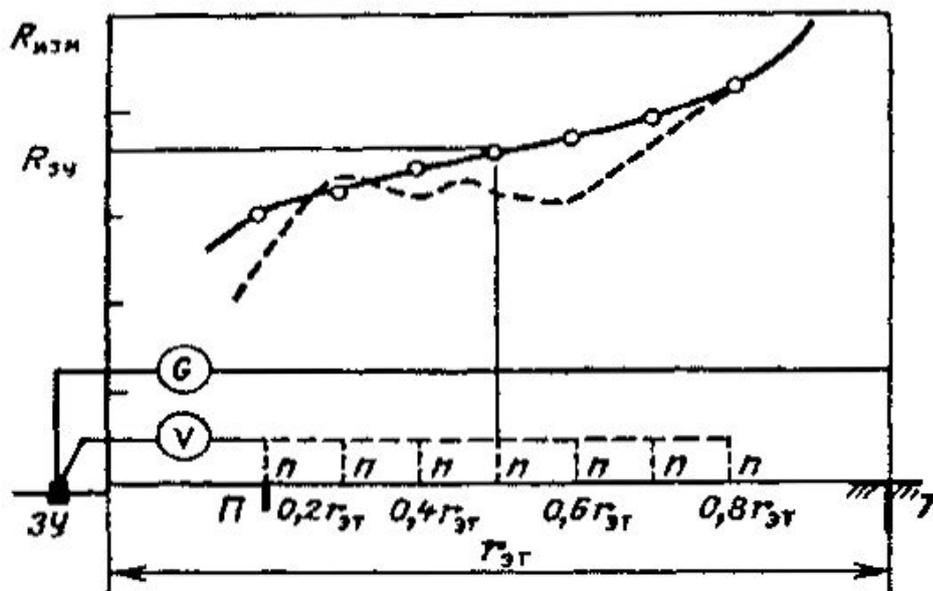


Рис. 5.4. Пример построения зависимости измеренного сопротивления заземляющего устройства от положения потенциального электрода

Измерительные электроды рекомендуется размещать по однолучевой схеме рис. 5.4: токовый электрод  $T$  на расстоянии  $r_{зт} = 2D$  (предпочтительно  $r_{зт} = 3D$ ) от края испытуемого заземляющего устройства ( $D$  - наибольшая диагональ заземляющего устройства) и потенциальный электрод  $П$  устанавливаются поочередно на расстояниях  $0,2r_{зт}$ ;  $0,3r_{зт}$ ;  $0,4r_{зт}$ ;  $0,5r_{зт}$ ;  $0,6r_{зт}$ ;  $0,7r_{зт}$ ;  $0,8r_{зт}$ .

Измерения сопротивления производят при установке потенциального электрода в каждой из указанных точек. По данным измерений строится кривая зависимости сопротивления от расстояния потенциального электрода до заземляющего устройства  $ЗУ$ .

Если вид полученной зависимости соответствует изображенной на рис. 5.4 сплошной линии, а значения сопротивлений, измеренные при положениях потенциального электрода на расстояниях  $0,4r_{зт}$  и  $0,6r_{зт}$ , отличаются не более чем на 10 %, то за сопротивление заземляющего устройства принимается величина, измеренная при расположении потенциального электрода на расстоянии  $0,5r_{зт}$ .

Если значения сопротивлений, измеренные при положениях потенциального электрода на расстояниях  $0,4r_{зт}$  и  $0,6r_{зт}$ , отличаются более чем на 10 %, то измерения сопротивлений необходимо повторить при увеличенном в 1,5 - 2 раза расстоянии до токового электрода.

Если полученная измерением зависимость сопротивления отличается от зависимости, изображенной сплошной линией (например, как изображенная штриховой линией), что может быть следствием влияния подземных или наземных коммуникаций, то измерения должны быть повторены при расположении токового электрода в другом направлении от заземляющего устройства. Измерительные электроды должны быть приняты в соответствии с инструкцией к применяемому прибору.

Измерительные приборы (амперметр, вольтметр, измеритель заземления) и трансформатор тока должны иметь класс точности не менее 2,5. При применении измерителей сопротивления (например, типа МС - 08) или

геофизического прибора ИКС их токовые и потенциальные зажимы следует присоединять к испытываемому заземлителю отдельными проводниками.

В целях исключения возможного влияния посторонних токов на результаты измерения необходимо проверить наличие напряжения между заземлителем и потенциальным электродом при отключенном источнике измерительного тока.

При наличии напряжения от посторонних токов необходимо принять меры к возможному уменьшению его значения (например, отключить электросварку) или уменьшению его влияния.

Для этой цели рекомендуется повысить измерительное напряжение (если это возможно по условиям техники электробезопасности) или использовать отстройку по частоте (применить прибор типа ИКС или МС - 08). В отдельных случаях может помочь также изменение направления разноса измерительных электродов. Схема разбирается лишь после выполнения всех измерений и подсчетов, подтверждающих удовлетворительный результат измерений.

Наибольшее сопротивление заземлитель имеет летом при наибольшем высыхании земли или зимой при наибольшем ее промерзании. Если сопротивление заземлителя измерялось в сезон, отличный от предполагаемого сезона наибольших его значений, то измеренную величину  $R_3$  умножают на сезонный коэффициент сопротивления заземлителя  $K_c$ . При измерении  $R$  сложных заземлителей в виде замкнутого контура целесообразно отмерять расстояния от края контура, как показано на рис. 5.5, 5.6, при этом расстояние от геометрического центра сложного заземлителя до края контура  $a$  следует определять, используя проектные данные.

Если заземлитель выполнен в виде одиночной горизонтальной полосы с рядом вертикальных электродов (гребенка) или без них (простой горизонтальный), то результаты измерения  $R$  оказываются достаточно точными при расположении  $T$  и  $II$  в соответствии с рис. 5.7.

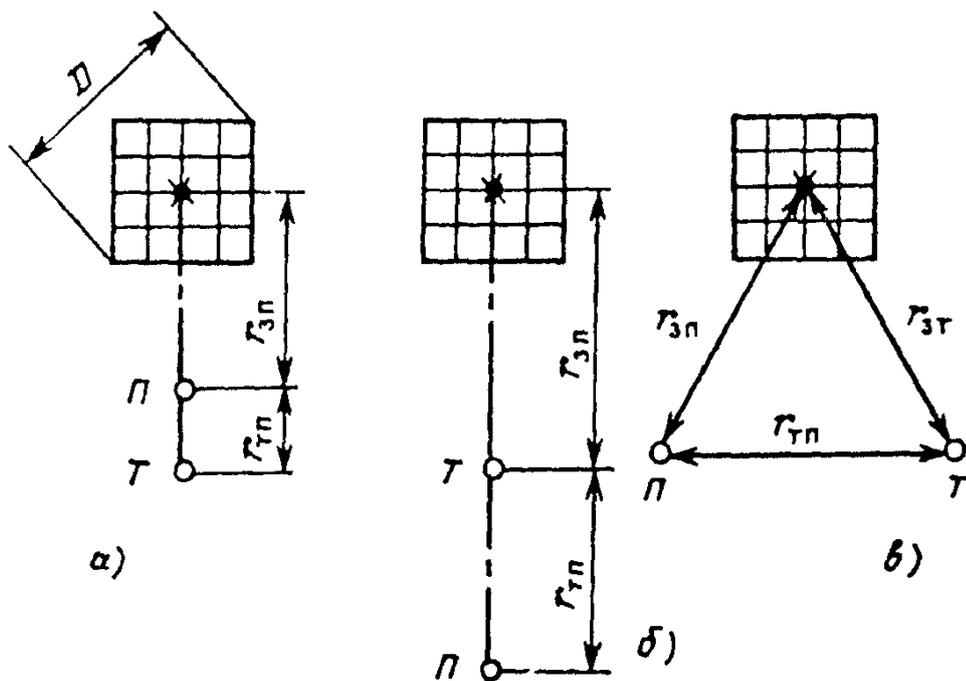


Рис. 5.5. Основные схемы взаимного расположения заземлителя  $Z$  и электродов  $T$  и  $\Pi$ :

$a, б$  - однолучевые схемы;  $в$  - двухлучевая схема;  $\times$  - центр заземлителя

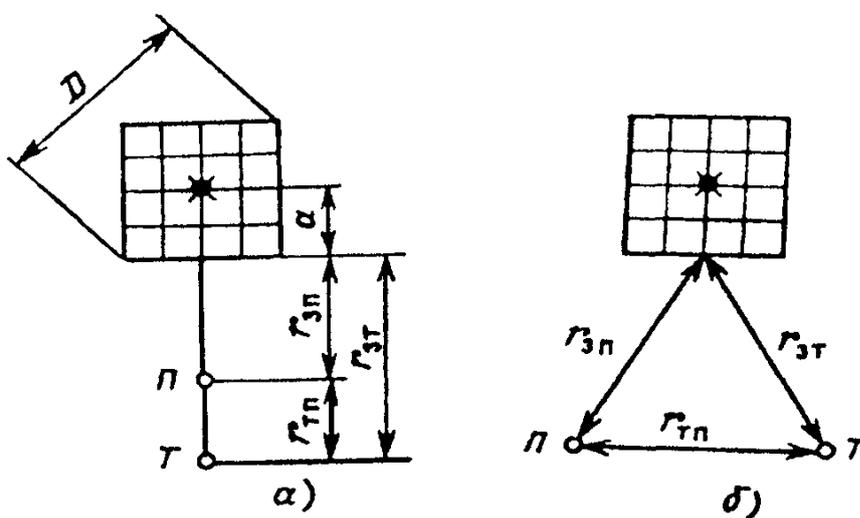


Рис. 5.6. Определение расстояний до электродов  $T$  и  $\Pi$  от края контура сложного заземлителя:

$a$  - однолучевая схема;  $б$  - двухлучевая схема;  $\times$  - центр заземлителя

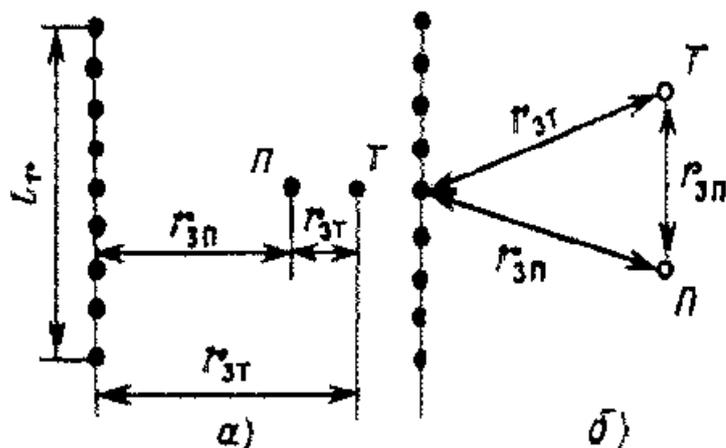


Рис. 5.7. Схемы расположения электродов  $T$  и  $П$  при измерении сопротивления сложного заземлителя в виде гребенки:

$a$  - однолучевая;  $b$  – двухлучевая

В настоящее время для измерения сопротивления заземляющего контура появились бесконтактные способы измерений. Для этих целей используется способ измерения сопротивления заземления с помощью токоизмерительных клещей, что упрощает тестирование контура заземления и обеспечивает возможность измерения тока утечки неразрушающим методом. Новизна состоит в том, что измерение сопротивления контура заземления и тестирование его целостности можно выполнять без разрыва цепи. На рынке измерительных приборов в настоящее время представлен широкий ряд таких приборов, одним из которых является Fluke 1630.

В Fluke 1630 используется метод безэлектродного тестирования, который исключает необходимость размыкания параллельных заземляющих стержней и установки дополнительных электродов заземления. Это экономит время и позволяет пользователям - электромонтерам жилых и производственных помещений, специалистам техобслуживания электрооборудования в полевых условиях и подрядчикам - выполнять тестирование контура заземления в местах, где невозможно применение других методов, например, внутри зданий или на опорах линий электропередач. Безэлектродный метод исключает необходимость применения дополнительных заземляющих электродов.

Измерительные клещи Fluke 1630 располагаются вокруг заземляющего стержня или соединительного кабеля. Известное напряжение фиксированной амплитуды, индуцированное одними клещами, измеряется с помощью вторых клещей. Тестер автоматически определяет сопротивление контура заземления для данного соединения.

Компактная и прочная конструкция позволяет применять Fluke 1630 в труднодоступных местах и в жестких условиях окружающей среды, а функция фиксации показаний и звуковой сигнал при проверке целостности контура обеспечивают удобство в использовании. Прибор имеет широкий диапазон измерения сопротивлений - от 0,025 Ом до 1500 Ом - для обеспечения всех возможных требований. Кроме того данный прибор имеет много других дополнительных функций.

### **§5.3. Измерение напряжения прикосновения**

При измерениях в процессе приемосдаточных испытаний и при периодических измерениях в эксплуатации рекомендуется применять метод амперметра-вольтметра.

Метод амперметра-вольтметра при повторно-кратковременном приложении напряжения до 500 В промышленной частоты (длительность импульсов 0,05 - 0,1 с, длительность пауз 5 - 10 с) позволяет получить большое значение измерительного тока при обеспечении электробезопасности производства измерений без специально принимаемых мер. Сущность метода амперметра-вольтметра заключается в одновременном измерении тока (измерительного), стекающего с заземлителя, и напряжения прикосновения, обусловленного этим током.

Измерительная цепь (рис. 5.8) состоит из источников питания (ЭДС или тока), испытуемого заземлителя  $ZУ$ , токового электрода  $T$ , потенциального электрода  $П$ , проводов и измерительных приборов.

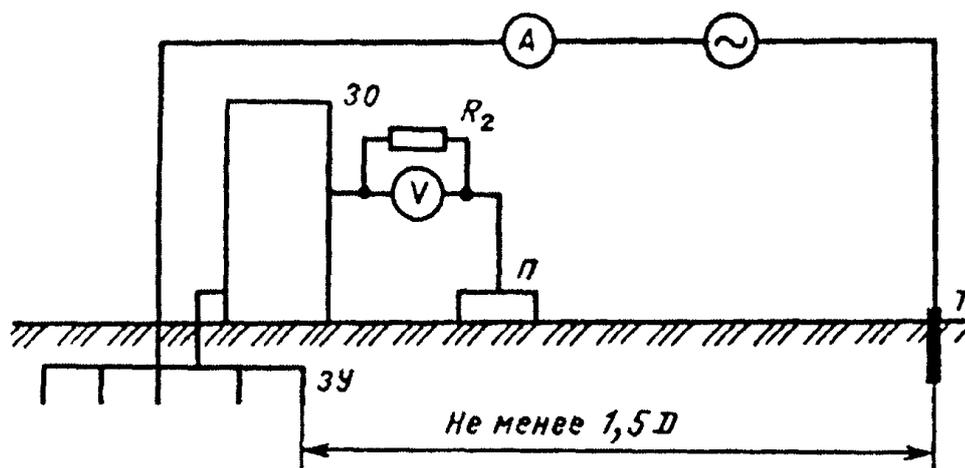


Рис. 5.8. Принципиальная схема измерения напряжения прикосновения по методу амперметра-вольтметра:

$ЗУ$  - заземляющее устройство;  $ЗО$  - заземленное оборудование;  $П$  - потенциальный электрод;  $Т$  - токовый электрод;  $R$  - резистор, имитирующий сопротивление тела человека

Напряжение прикосновения измеряется, как разность потенциалов между доступными прикосновению заземленными металлическими частями оборудования или конструкции и потенциальным электродом, имитирующим подошвы человека, стоящего в контрольной точке на земле (на полу). Сопротивление тела человека имитируется эквивалентным сопротивлением параллельно включенных вольтметра  $V$  и резистора  $R$ .

При использовании метода амперметра-вольтметра в качестве источника ЭДС могут применяться трансформатор собственных нужд, разделяющий трансформатор с вторичным напряжением до 500 В и мощностью до 100 кВ·А, питающийся от трансформатора собственных нужд, автономный генератор.

Для осуществления повторно-кратковременного режима приложения напряжения рекомендуется применять бесконтактный тиристорный короткозамыкатель с регулируемой длительностью импульсов и пауз.

При использовании трансформатора собственных нужд схема токовой цепи собирается в соответствии с рис. 5.9. Нейтраль вторичной обмотки трансформатора при этом заземляется. Если имеется возможность изменять

место заземления нейтрали, ее заземление следует выполнять в точке *A* в соответствии с указаниями для заземления вторичной обмотки разделяющего трансформатора.

При использовании тиристорного короткозамыкателя (ЭКЗ) он включается последовательно в токовую цепь. При использовании разделяющего трансформатора токовая цепь выполняется в соответствии с рис. 5.9, б).

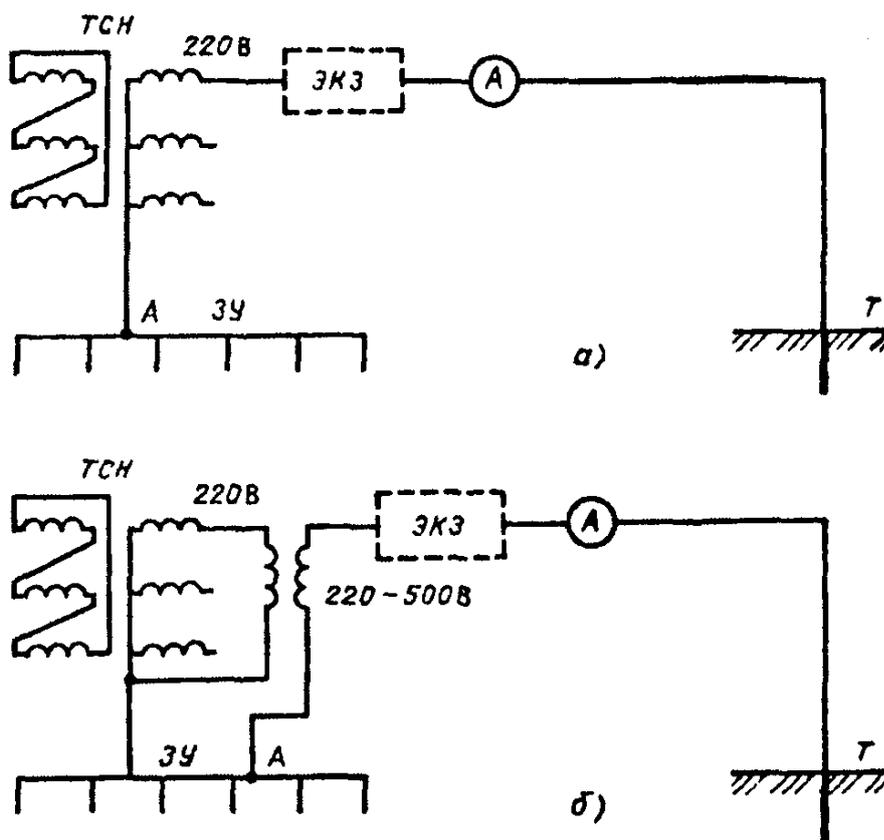


Рис. 5.9. Принципиальные схемы токовых цепей при измерениях напряжений прикосновения по методу амперметра-вольтметра:

*а* - от фазы трансформатора собственных нужд (ТСН); *б* - через дополнительный трансформатор

Точка ввода тока в заземляющее устройство (точка *A*) располагается:

- а) при измерениях у рабочих мест - непосредственно у места измерений;
- б) при измерениях на остальной территории - по одному из двух вариантов: при заземленных нейтралях силовых трансформаторов - у места

заземления нейтрали одного из трансформаторов (предпочтительно с наибольшей мощностью); при разземленной нейтрали силового трансформатора и наличии короткозамыкателя - в месте заземления короткозамыкателя.

В качестве потенциального электрода следует применять металлическую квадратную пластину размером 25×25 см. (рис. 5.10). Поверхность земли в контрольных точках должна быть тщательно выровнена (в габаритах потенциального электрода). Землю под потенциальным электродом рекомендуется увлажнять на глубину 2 - 3 см. На потенциальный электрод (пластину) должен быть положен груз массой не менее 30 кг.

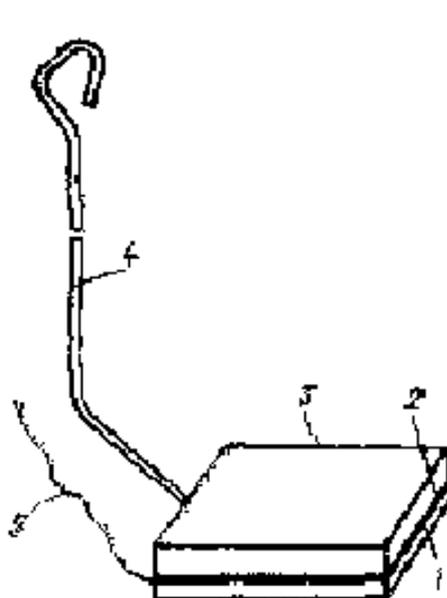


Рис. 5.10. Потенциальный электрод, имитирующий две ступни человека:

1 - влажная суконная прокладка; 2 - медная пластина; 3 - пластина из изоляционного материала; 4 - рукоятка переноса электрода; 5 - проводник для подключения потенциального электрода к вольтметру

Измерительный ток и точность измерения напряжений прикосновения зависят от сопротивления и расположения токового электрода.

Сопротивление токового электрода, как правило, не должно превышать сопротивление испытываемого заземлителя более чем в 20 раз.

Расстояние между ближайшей частью испытываемого заземлителя и токовым электродом должно быть не менее  $1,5D$  ( $D$  - больший линейный размер заземлителя в плане, но не менее 20 м. Если заземлитель имеет внешний замкнутый контур, то  $D$  - большая диагональ). Токовый электрод не должен располагаться вблизи подземных металлических коммуникаций (трубопроводы, кабели с металлической оболочкой и броней) или железобетонных оснований и фундаментов, имеющих металлическую связь с испытываемым заземлителем или проходящих вблизи него.

В случае отсутствия заземлителей, которые могли быть использованы в качестве токового электрода, токовый электрод (заземлитель) рекомендуется выполнять в виде нескольких соединенных проводниками вертикальных стержневых заземлителей диаметром 10 - 12 мм и длиной 1,5 - 2,5 м, погружаемых в землю на глубину 1,2 - 2,2 м и на расстоянии 3,5 м один от другого. При удельном сопротивлении земли до 100 Ом·м в качестве токового электрода обычно достаточно использовать два-три вертикальных стержневых заземлителя, при большем удельном сопротивлении земли - четыре и более вертикальных заземлителей.

При измерении методом амперметра-вольтметра токовую цепь следует выполнять изолированным проводом, сечение которого выбирается исходя из ожидаемого значения измерительного тока, но не менее  $2,5 \text{ мм}^2$ . Падение напряжения в токовом проводе, как правило, не должно превышать 10 % номинального напряжения источника питания. Потенциальная цепь должна выполняться изолированным проводом с сечением, выбранным по механической прочности.

Эквивалентные сопротивления включенных параллельно вольтметра и резистора не должны выходить за пределы  $1 \pm 0,05 \text{ кОм}$  (если входное сопротивление вольтметра равно или больше 20 кОм, то следует использовать резистор с сопротивлением 1 кОм).

Амперметр, трансформатор тока и вольтметр должны иметь класс точности не менее 2,5. Рекомендуется применять многопредельные вольтметры

с пределами измерений от долей вольта до нескольких сотен вольт. Можно использовать находящиеся в эксплуатации многопредельные вольтамперметры, например Ц430, Ц433, Ц434 и др.

При применении метода амперметра-вольтметра с повторно-кратковременным приложением напряжения к испытываемому заземлителю измерения действующих значений напряжения прикосновения и измерительного тока должны выполняться с помощью импульсных вольтметра и амперметра. Пределы измерений приборов рекомендуется выбирать так, чтобы при измерениях стрелка прибора отклонялась не менее чем на две трети шкалы.

На точность измерений могут оказывать значительное влияние так называемые посторонние токи в земле (блуждающие токи, а также обусловленные рабочим режимом электроустановки токи, стекающие с заземлителя в землю). Поэтому перед измерениями необходимо выяснить наличие посторонних токов в земле, принять по возможности меры к их уменьшению или обеспечить условия, при которых напряжение на заземлителе от измерительного тока было бы по крайней мере в 10 раз больше, чем значение напряжения, обусловленное посторонними токами.

Напряжения помех следует определять по показанию вольтметра при отключенном источнике питания измерительной цепи.

Напряжения прикосновения рекомендуется измерять в контрольных точках, в которых эти значения определены расчетом при проектировании. Для сопоставления измеренных и расчетных значений напряжений прикосновения необходимо пересчитать измеренные значения на расчетный ток короткого замыкания с учетом сезонных изменений удельных сопротивлений грунта.

Программа измерений при КЗ должна включать схемы первичных соединений, выделяемые для КЗ, схему измерений, порядок подготовки схем, перечень выделяемого оборудования, порядок измерений, перечень мер, обеспечивающих безопасность, перечень ответственных лиц.

Измеренные значения напряжений прикосновения должны быть приведены к расчетному току замыкания на землю и к сезонным условиям, при которых напряжения прикосновения имеют наибольшее значение, по формуле:

$$U_{np} = U_{изм} \frac{I_{к.расч} 1000 + R_{ст.изм.ср}}{I_{изм} 1000 + R_{ст.мин}}, \quad (5.3)$$

где  $U_{изм}$  - измеренное значение напряжения прикосновения при токе в измерительной цепи;

$I_{к.расч}$  - расчетный для заземляющего устройства ток короткого замыкания;

$R_{ст.изм.ср}$  - среднее значение сопротивлений потенциального электрода, измеренных по схеме рис. 5.4 в момент измерения напряжений прикосновения;

$R_{ст.мин}$  - минимальное значение сопротивления потенциального электрода.

Сопротивление потенциального электрода  $R_{ст.изм}$  измеряется с помощью мегаомметра со шкалой от 100 Ом в четырех - шести точках измерения напряжения прикосновения при существующей при этих измерениях влажности грунта (при сухом грунте во время измерения  $U_{np}$  производится увлажнение грунта под потенциальным электродом на глубину 2 - 3 см). Для пересчета используется среднее из измеренных значений  $R_{ст.изм}$ .

Минимальное значение сопротивления потенциального электрода  $R_{ст.мин}$  измеряется по схеме рис. 5.4 в одной из точек после измерения  $U_{np}$  и  $R_{ст.изм}$  при искусственно увлажненном на глубину 20 - 30 см грунте.

При отсутствии возможности увлажнения грунта на глубину 20 - 30 см с принимается по следующим значениям:

Грунт в месте измерений .....	Удельное сопротивление, Ом
Бетон, травяной покров на глинистом грунте,	
супесь без травы .....	250
Песок, песчано-гравийная смесь, очень мелкий	
загрязненный почвой щебень, травяной покров на песке .....	1200
Щебень, загрязненный почвой, метлахская плитка .....	10000

Если при измерениях  $R_{ст.изм}$  получилось меньше указанных значений, то  $R_{ст.мин}$  принимается равным  $R_{ст.изм}$ .

Если во время измерения напряжений прикосновения грунт на площадке подстанции (РУ) увлажнен на глубину 30 - 40 см и более, то вместо поправочного коэффициента  $\frac{1000 + R_{ст.изм}}{1000 + R_{ст.min}}$  применяется коэффициент, равный 1,5.

Полученные данные при измерении вносятся в протокол, форма которого приведена в приложении А.

#### **§5.4. Меры безопасности при контроле ЗУ**

Работы по измерениям характеристик ЗУ должны производиться в соответствии с действующими Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок. Работы по измерениям электрических характеристик следует выполнять по нарядам.

При измерениях на действующих энергообъектах с использованием вынесенных токовых и потенциальных электродов должны приниматься меры к защите от воздействия полного напряжения на заземлителе при стекании с него тока однофазного КЗ на землю.

Персонал, производящий измерения, должен работать в диэлектрических ботах, диэлектрических перчатках, пользоваться инструментом с изолированными ручками.

При сборке измерительных схем следует сначала присоединять провод к вспомогательному электроду (токовому, потенциальному) и лишь затем к соответствующему измерительному прибору.

## 5.5. Документация на ЗУ электроустановки

На каждое ЗУ составляются паспорт и протокол проверки состояния ЗУ (см. приложение Г и Д).

В паспорте должно быть отражено следующее:

- дата ввода ЗУ в эксплуатацию (дата реконструкции или ремонта ЗУ);
- основные параметры заземлителя (материал, профиль, сечение проводников);
- данные по сопротивлению ЗУ;
- исполнительная схема ЗУ, выполненная в масштабе, с указанием магистралей искусственного заземлителя, заземляемого оборудования, мест присоединения заземляющих проводников к ЗУ (на исполнительной схеме должны быть показаны все подземные и наземные связи ЗУ);
- удельное сопротивление грунта;
- данные по напряжению прикосновения;
- данные по сопротивлению связи оборудования с ЗУ;
- степень коррозии искусственных заземлителей;
- сведения по электромагнитной совместимости;
- ведомость дефектов, обнаруженных в ходе текущих проверок;
- сведения по устранению замечаний и дефектов ЗУ;
- заключение о пригодности ЗУ к эксплуатации.

При вводе вновь сооружаемых объектов, реконструкции или текущей проверке ЗУ проводится комплекс измерений и расчетов, на основании которых определяется состояние ЗУ и его соответствие требованиям нормативных документов.

## §5.6. Рекомендации по ремонту и усилению ЗУ

При отклонении параметров ЗУ от нормы или при обнаружении повреждений ремонт и усиление ЗУ в большинстве случаев можно выполнить силами предприятия. Для этого рекомендуются следующие наиболее эффективные меры.

*Если сопротивление ЗУ выше нормы:*

- подключить к ЗУ подстанции все грозозащитные тросы, предварительно проверив их на термическую устойчивость к токам КЗ;

- подключить к ЗУ рельсовые пути, соединив их с нейтралью трансформаторов и сварив все стыки, за исключением изолирующих стыков устройств СЦБ (на подходе к подстанции);

- соединить ЗУ с водоводами, особенно в тех местах, где трасса водовода пересекается горизонтальными заземлителями; места приварки соединительных электродов к водоводу тщательно изолировать от грунта;

- подсоединить к ЗУ артезианские скважины, находящиеся на территории подстанции и вблизи нее, приняв меры к снижению напряжений прикосновения;

- проложить за территорией подстанции лучевые заземлители, лучше вдоль линий электропередачи, соединив их с ЗУ и заземлителями (фундаментами) опор ВЛ. Число лучей рекомендуется не более четырех - по одному с каждой стороны подстанции. Ориентировочная суммарная длина лучей  $l$  определяется из выражения

$$l = R_{\text{изм}} 5 \sqrt{\frac{S}{R_{\text{норм}}}}, \quad (5.4)$$

где  $R_{\text{изм}}$  - измеренное сопротивление заземления;

$S$  - площадь, занимаемая ЗУ;

$R_{\text{норм}}$  - нормативное сопротивление.

*Если напряжение прикосновения на заземляющем устройстве выше нормы:*

- при значительном превышении измеренного значения над средним по подстанции произвести откопку заземляющего проводника, отыскать место разрыва (в том числе плохой контакт в сварном соединении) и соединить сваркой;
- произвести подсыпку щебня, гальки толщиной 10-20 см на площади, за пределы которой человек не выходит при производстве оперативного переключения на данном присоединении;
- уложить на глубину 0,1 м сетчатый заземлитель из круглой стали диаметром не менее 6 мм, соединив его с заземляющим проводником. Ячейка сетки 0,5 x 0,5 мм<sup>2</sup>;
- на бетонные плиты, находящиеся постоянно во влажном состоянии, постелить резиновые коврики;
- в отдельных случаях временно допускается распоряжением по предприятию обязать персонал производить переключения в изолирующей обуви.

*Если обнаружены коррозионные повреждения:*

- при малом сечении заземляющих проводников произвести их замену на круглые большего сечения, выбранные по термической устойчивости и увеличенные (по диаметру не менее чем на 2 мм) по условиям коррозии;
- при заметной коррозии изолировать места входа в грунт заземляющих проводников с помощью ПХВ - ленты на 20 см выше и ниже поверхности грунта;
- при обнаружении коррозии сварных соединений очистить от коррозии и изолировать ПХВ - лентой сварные соединения;
- при повреждениях водовода заменить трубу и к местам, соответствующим выявленным повреждениям, приварить проводник из круглой стали диаметром не менее 12 мм, проложив его по кратчайшему пути к ближайшему горизонтальному заземлителю.

*При обнаружении слабых металловых связей:*

- при отсутствии восстановить, используя круглые проводники соответствующего сечения;
- проложить связи между ОРУ и местом заземления нейтралей трансформаторов сталью круглого сечения диаметром не менее 12 мм, максимально используя пути перекачки трансформаторов;
- использовать для усиления связи грозозащитный трос ВЛ от трансформаторов к ОРУ, проверив его на термическую устойчивость;
- проложить дополнительные проводники (не менее двух) из круглой стали диаметром не менее 12 мм между ЗУ различных ОРУ таким образом, чтобы шунтировать ОРУ с обеих сторон.

При прочих ненормальностях, в том числе в работе релейной защиты, автоматики, связи, при КЗ на подстанции по невыясненным причинам, обращаться в специализированные организации.

**ПРОТОКОЛ  
испытания заземляющего устройства**

(объект)

1. Характеристика электроустановки (заземляемого объекта)

Номинальное напряжение РУ кВ \_\_\_\_\_

По проекту	Режим нейтрали		
	Расчетный ток однофазного КЗ, кА	для рабочих мест	
Время отключения КЗ, с		для остальной территории	
		основной защитой	
		резервной защитой	
В период измерения	Расчетный ток однофазного КЗ, кА	для рабочих мест	
		для остальной территории	
	Время отключения КЗ, с	основной защитой	
		резервной защитой	

Расчетные формулы:

2. Проверка состояния элементов заземляющих устройств Заземление выполнено по проекту \_\_\_\_\_

Чертежи № \_\_\_\_\_

Отклонения от проекта: \_\_\_\_\_

согласованы

Акт на скрытые работы см. \_\_\_\_\_

Осмотром мест подключения подлежащего заземлению электрооборудования, элементов наружной сети заземляющего устройства установлено, что \_\_\_\_\_

3. Измерение напряжения прикосновения

Сопротивление потенциального электрода:

Ом (среднее)      Ом (при искусственном увлажнении)

Расчетная точка по проекту	Измерено сопротивление $R$ , Ом	Измерительный ток $I$ , А	Напряжение прикосновения, В			Заключение
			измеренное	расчетное	допустимое	

Состояние грунта при измерении \_\_\_\_\_

(влажный, сухой, мерзлый)

Погода при измерении \_\_\_\_\_

(сухо, дождь, снег, температура воздуха)

Измерительные приборы \_\_\_\_\_

4. Измерение сопротивления заземляющего устройства

Зависимость измеренного сопротивления от положения потенциального электрода	Относительное расстояние до потенциального электрода	Сопротивление, Ом
	0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7	
0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9	Метеорологические условия	

Расчетный потенциал на заземляющем устройстве \_\_\_\_\_

Сопротивление измерялось методом \_\_\_\_\_

прибором \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Схема контура заземления, места подключения измерительных приборов при измерении и размещении вспомогательных электродов (указать размеры контура, расстояние А до токового электрода и до потенциальных электродов)

Примечание: \_\_\_\_\_

Заключение: \_\_\_\_\_

Испытание произвел \_\_\_\_\_

(подпись, фамилия, дата)

### Пример определения реальной схемы ЗУ с помощью измерительного комплекса КДЗ-1

В качестве примера рассмотрена методика проведения диагностики ЗУ подстанции с помощью комплекса КДЗ-1.

1. Определяется часть территории подстанции, на которой будут производиться измерения - пример представлен на рис. Б1. Магистрали заземления, представленные на рис. Б1, должны быть выявлены в ходе измерений.

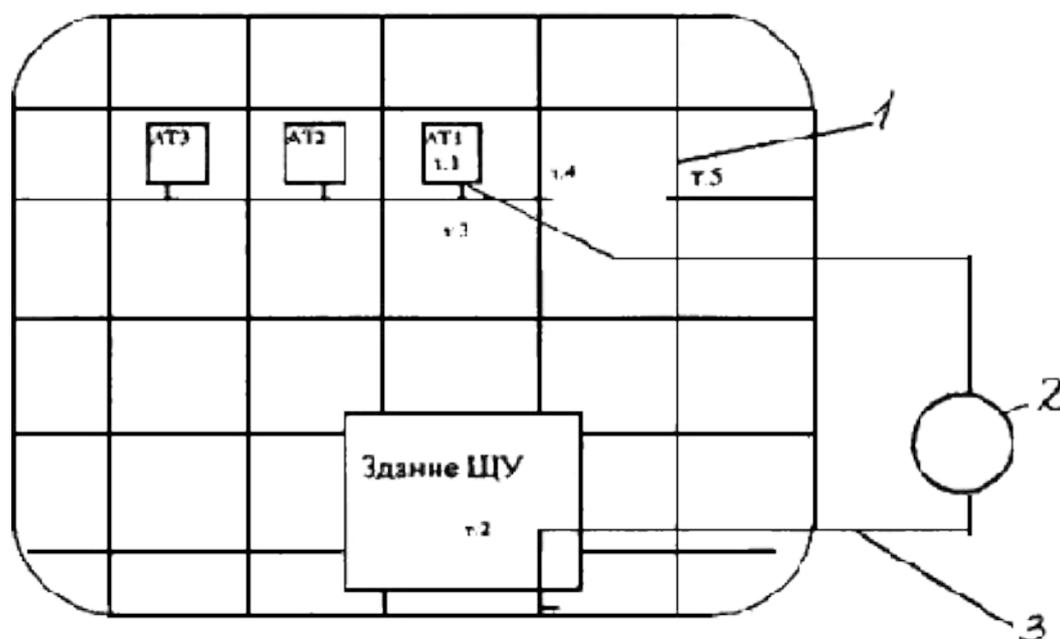


Рис. Б1. Схема прокладки магистралей ЗУ:

1 - магистраль заземления; 2 - ИПТ; 3 - соединительные провода

2. С помощью соединительных проводов ИПТ подключается к двум точкам ЗУ, например, к корпусу автотрансформатора АТ1 (т.1) и магистрали заземления здания ЩУ (т.2), как показано на рис. Б1.

3. Включается ИПТ, и регулятором устанавливается ток, обеспечивающий магнитное поле на измерительных проводах, напряженность которого превышает максимальное фоновое как минимум в 10 раз.

4. Магистраль искусственного заземлителя определяется следующим образом:

Начиная от т.1 (см. рис. Б1) находится направление на поверхности грунта с наибольшим значением напряженности магнитного поля, соответствующее реальному направлению прокладки заземлителя. На рис. Б1 первый участок искусственного заземлителя соответствует отрезку между точками 1 и 3, второй - отрезку между точками 3 и 4 и т.д. до точки 2.

5. В местах ответвлений искусственного заземлителя повторяются измерения по п.4 настоящего приложения и определяются остальные магистрали заземлителя, связывающие точки 1 и 2.

6. Постепенным переходом от одного узла ЗУ к другому составляется трасса прокладки шин заземлителя в грунте на исследуемом участке РУ. Для перехода к следующему участку необходимо произвести переключение ИПТ к двум другим точкам ЗУ.

7. Обрывы ЗУ выявляются следующим образом.

Если магистраль заземления имеет обрыв (например, между точками 4 и 5 рис.П2.1), то при перемещении от т.4 к т.5 показания ИПМ должны быть на уровне фона, поскольку ток по отрезку между точками 4 и 5 не протекает.

8. Выборочно определяется глубина прокладки горизонтальных шин заземлителя (не менее чем через каждые 10 м последних).

9. На основании полного обследования территории РУ составляется истинная схема прокладки магистралей искусственного заземлителя с указанием возможных мест обрыва.

10. Определяются связи между технологическим оборудованием и ЗУ. Например, обследуется связь АТ1 с ЗУ. Для этого источник ИПТ подключается между проводником, заземляющим корпус АТ1 (т.1 рис. Б1), и другой точкой ЗУ (т.4 рис. Б1). Включается ИПТ и определяется напряженность  $H_{\Sigma}$  на

соединительном проводе. С помощью ИПМ определяется доля суммарного магнитного поля  $H_{\Sigma}$  от токов, протекающих:

- вниз, в искусственный заземлитель;
- по оболочкам силовых и измерительных кабелей;
- по трубам или каркасам порталов и других металлоконструкций.

Аналогично производятся измерения для всего оборудования электроустановки. Заполняется табл. Д1 (см. приложение Д). Одновременно по мере необходимости заполняется табл. Д2, в которой указывается оборудование, не имеющее связи с ЗУ.

11. На основе измерений по пп.9 и 10 настоящего приложения составляется схема ЗУ, включающая в себя магистрали искусственного заземлителя, кабельные каналы, порталы и другие металлоконструкции, имеющие связи с ЗУ.

12. Определяется сопротивление связи между электротехническим оборудованием по ЗУ - табл. Д3 приложения Д.

**Выбор сезонного коэффициента, измерение электрохимического потенциала и определение наличия блуждающих токов**

*1. Выбор сезонного коэффициента сопротивления заземлителя*

При определении сопротивления ЗУ  $R_{ЗУ}$ , расчете напряжения на ЗУ  $U_{ЗУ}$  используется сезонный коэффициент сопротивления заземлителя  $K_c$ .

Сезонный коэффициент сопротивления обычно указывается в проекте подстанции. При наличии проектных данных значение сезонного коэффициента  $K_c$  принимается таким, каким он указан в проекте.

При отсутствии проектных данных сезонный коэффициент выбирается ориентировочно по табл. В1. Сезонный коэффициент сопротивления зависит от:

- размеров ЗУ, определяемых его площадью и длиной вертикальных электродов;
- электрического строения грунта;
- сезонного коэффициента удельного сопротивления грунта  $K_p$  (табл. В2);
- географического района расположения подстанции.

Значения сезонных коэффициентов сопротивления, отсутствующие в табл. В1, определяются путем интерполяции (вертикальные электроды длиной 30 и 50 м относятся к глубинным заземлителям).

Сезонные коэффициенты сопротивления заземлителей  $K_c$ 

Значение корня квадратного из площади п/ст $\sqrt{S}$ , м	Электрическое строение грунта	$K_p$ по табл. В2	$K_c$ в географических районах									
			Европейская часть южнее 48-й параллели	Европейская часть и Западная Сибирь между 48-й и 57-й параллелями, Ленинградская, Новгородская, Сахалинская обл., Приморский край			Остальная территория России					
				при длине вертикальных электродов, м								
				0-6	30	50	0-6	30	50	0-6	30	50
10	Грунтовые воды	3	1,4	1,3	1,0	1,5	1,5	1,1	1,1	1,9	1,2	
		20	1,9	1,5	1,1	2,8	2,1	1,1	5,4	4,8	1,4	
		50	2,0	1,6	1,1	4,0	2,2	1,1	10	8,5	1,4	
	Однородный	3	1,1	1,1	1,0	1,4	1,1	1,0	2,0	1,4	1,0	
		20	1,4	1,1	1,0	4,4	1,2	1,0	9,2	5,9	1,0	
		50	1,8	1,1	1,0	9,5	1,3	1,0	22	14	1,0	
	Подстилающие породы, скальные	3	1,2	1,0	1,0	2,3	1,0	1,0	2,7	2,6	1,0	
		20	2,9	1,1	1,0	13	1,1	1,0	17	16	1,0	
		50	5,7	1,1	1,0	32	1,1	1,0	43	40	1,0	
50	Грунтовые воды	3	1,2	1,1	1,0	1,2	1,2	1,0	1,5	1,5	1,2	
		20	1,4	1,2	1,0	1,7	1,7	1,1	2,5	2,9	1,3	
		50	1,5	1,3	1,1	2,3	2,0	1,1	3,9	4,5	1,3	
	Однородный	3	1,1	1,1	1,0	1,3	1,2	1,0	1,5	1,3	1,0	
		20	1,3	1,1	1,0	3,2	1,9	1,0	4,5	4,5	1,0	
		50	1,6	1,2	1,0	6,8	2,2	1,0	11	10	1,0	
	Подстилающие породы, скальные	3	1,2	1,1	1,0	2,1	1,3	1,0	2,4	2,4	1,0	
		20	2,5	1,5	1,1	11	1,6	1,0	14	14	1,0	
		50	4,8	2,0	1,1	28	1,6	1,0	35	35	1,0	
500	Грунтовые воды	3	1,1	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	
		20	1,3	1,1	1,0	1,4	1,4	1,3	1,6	1,8	1,4	
		50	1,3	1,2	1,0	1,8	1,8	1,4	2,3	2,5	1,6	
	Однородный	3	1,1	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2	1,3	1,4	1,2	
		20	1,2	1,1	1,0	2,9	2,7	1,5	3,9	4,0	1,6	
		50	1,5	1,2	1,0	5,8	4,7	1,6	8,4	8,6	1,7	
	Подстилающие породы, скальные	3	1,2	1,1	1,0	2,0	1,8	1,2	2,2	2,3	1,2	
		20	2,2	1,4	1,0	11	5,4	1,3	13	13	1,3	
		50	4,1	1,5	1,0	25	10	1,5	31	31	1,5	

Сезонные коэффициенты удельного сопротивления грунта  $K_p$ 

Тип грунта	$K_p$ при влажности*		
	нормативной	ниже нормы	выше нормы
Глина	3	2	10
Супесь, суглинок	5	3	20
Песок	10	3	50

\* Количество выпавших осадков за предшествующий измерениям период.

2. Измерение электрохимического окислительно-восстановительного потенциала  $\varphi_{ОВ}$  ЗУ и удельного сопротивления грунта  $\rho$ .

Измерения производятся по схеме, изображенной на рис. В1.

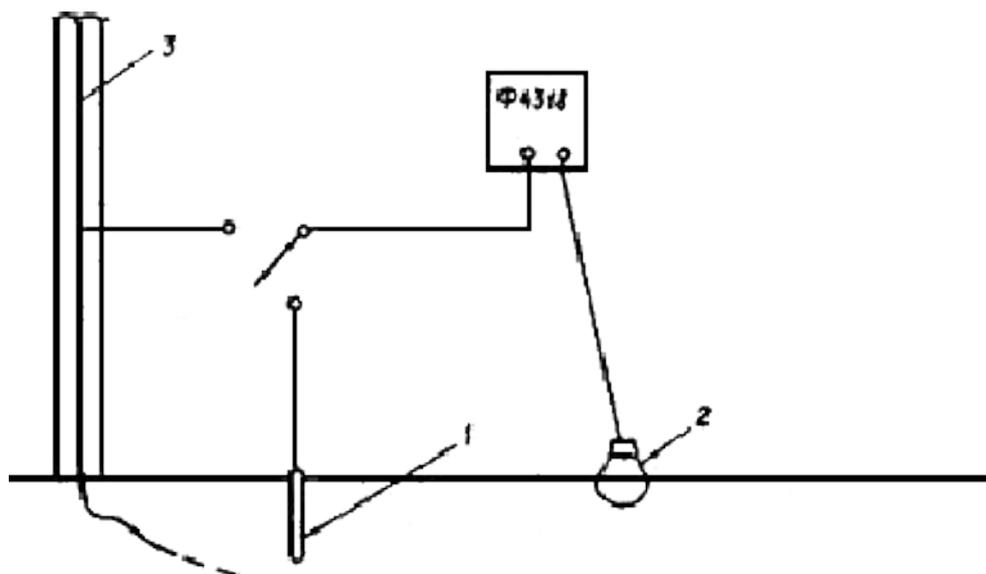


Рис. В1. Схема измерения электрохимического окислительно-восстановительного потенциала:

- 1 - пробный электрод длиной 0,5 м, диаметром 10 мм; 2 - электрод сравнения;  
3 - заземлитель ЗУ

Рекомендуется выполнить по 10-12 измерений в различных точках каждого ОРУ. Для подстанций 6,10/0,4 кВ можно ограничиться 1-3 измерениями.

Для измерений потребуются:

- пробный электрод из стали (Ст.3) диаметром 10 мм и длиной 0,6 м;
- электрод сравнения, в качестве которого следует использовать хлорсеребряный типа ЭВЛ (1 м) или медносульфатный типа ЭН-1;
- милливольтметр (МВ) постоянного напряжения с большим входным сопротивлением, например Ф 4318.

Пробный электрод погружается на глубину 0,5 м в грунт таким образом, чтобы не образовалось случайного контакта с заземлителем. Электрод сравнения устанавливается в предварительно очищенный (от травы, щебня и т.п.) и увлажненный грунт на расстоянии 0,5-1 м от пробного электрода. Между ними измеряется разность потенциалов  $\varphi_{п,с}$ , составляющая обычно 200-500 мВ, причем пробный электрод более отрицателен. Затем измеряется разность потенциалов между заземлителем ЗУ и электродом сравнения  $\varphi_з$ .

Если  $\varphi_з$  отличается от  $\varphi_{п,с}$  более чем на 100 мВ, то это означает, что на процессы грунтовой коррозии наложены контактная коррозия и (или) электрокоррозия блуждающими токами. В этом случае для обследования коррозионного состояния следует пригласить специализированную организацию.

После измерения электрохимического потенциала производится оценочное определение удельного сопротивления грунта путем измерения сопротивления пробного электрода  $R_{пв}$ , располагая токовый электрод на расстоянии 4 м, а потенциальный 2,5 м от измеряемого пробного электрода. Удельное сопротивление грунта  $\rho$  определяется по формуле

$$\rho = 0,6 R_{пв}.$$

По измеренному электрохимическому потенциалу определяется номер коррозионной зоны  $З_к$ :

$$З_к = \frac{6,2 - 0,83 \ln \varphi_{п,с}}{\rho}.$$

Значения  $Z_k$ , равные 0; 1; 2, соответствуют большой опасности коррозии; значения  $Z_k$ , равные 3 и 4, - средней степени опасности; равные 5 - слабой степени опасности. По кривым рис.П3.2, зная срок с момента сооружения подстанции, можно сделать прогноз коррозионного уменьшения сечения заземлителей и на основе этого выводы о состоянии заземлителя и сроках очередной проверки.

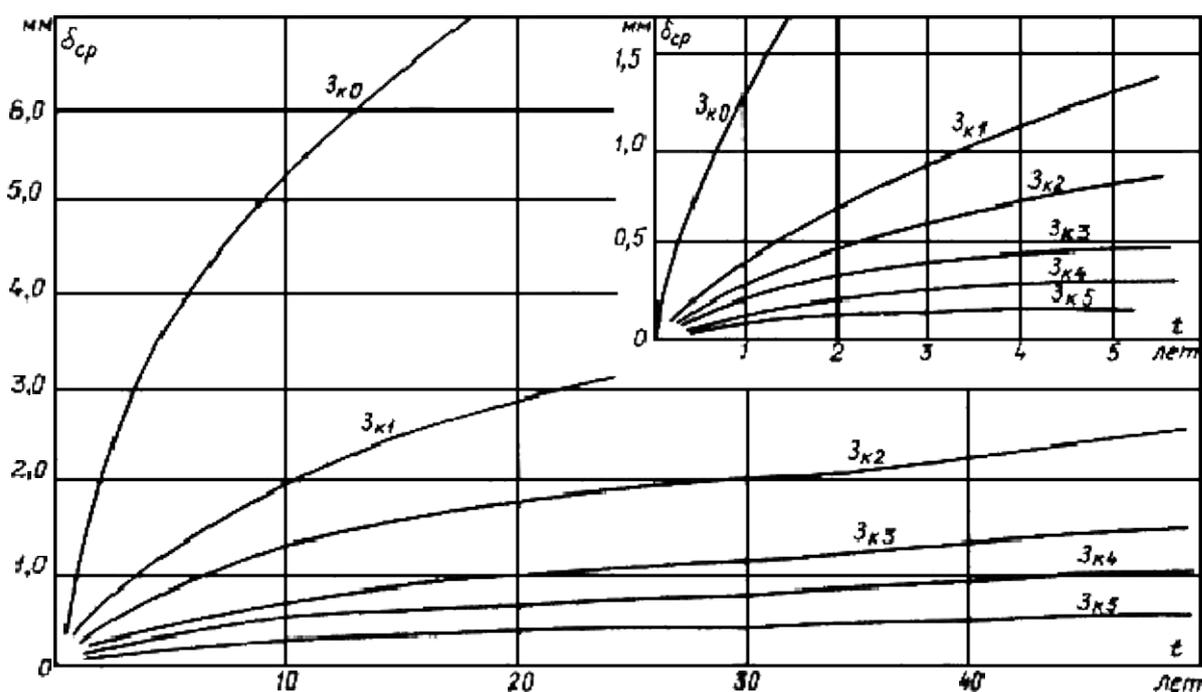


Рис. В2. Рост средней глубины грунтовой коррозии стали

В тех местах, где по результатам измерений вычислена наибольшая глубина коррозии, рекомендуется (для  $Z_k < 3$  необходимо) произвести вскрытие горизонтальных заземлителей. Если результаты вскрытия соответствуют прогнозируемому, то вносятся коррективы в сроки очередной проверки. Если осмотром и измерениями сечения обнаружено, что глубина коррозии выше прогнозируемой, следует обратиться к специализированной организации.

### 3. Определение наличия блуждающих токов в земле.

Наличие блуждающих токов в земле определяется по результатам измерений разности потенциалов между проложенными в данном районе подземными металлическими сооружениями и землей.

При отсутствии подземных металлических сооружений наличие блуждающих токов следует определять, измеряя разность потенциалов по двум взаимно перпендикулярным направлениям при разное измерительных электродов на 100 м (рис. В3).

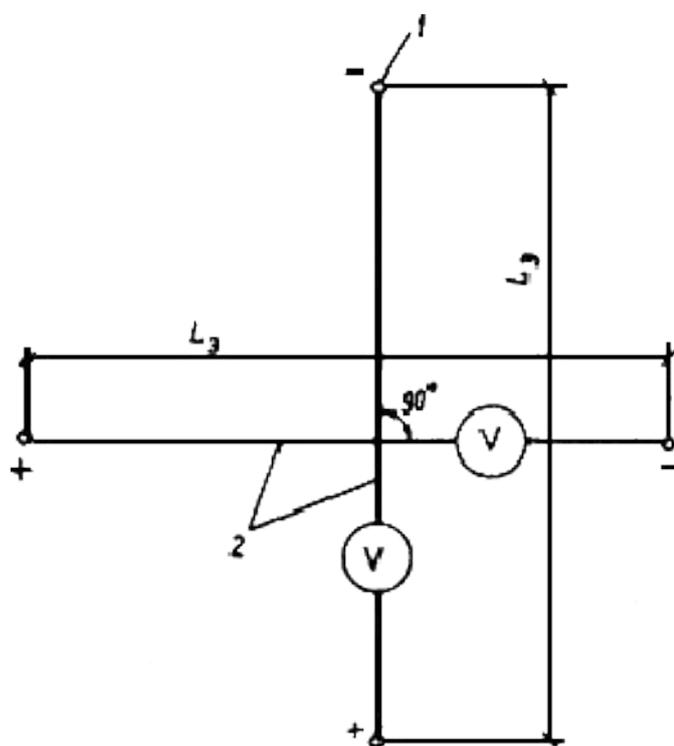


Рис. В3. Схема измерений для обнаружения блуждающих токов в земле:

1 - медносульфатные электроды; 2 - изолированные провода;

$L_3$  - расстояние между измерительными электродами

При проведении измерения используются медносульфатные электроды сравнения, которые подбираются так, чтобы разность э.д.с. двух электродов не превышала 2 мВ.

Возможны два варианта расположения измерительных электродов на местности: параллельно будущей трассе сооружения, а затем перпендикулярно

к оси трассы и в соответствии со сторонами света. Второй вариант удобен в тех случаях, когда изучаются коррозионные условия целого района, а также при сложной трассе подземного сооружения.

При проведении измерений необходимо особенно внимательно следить за подключением осциллографа. Если измерительные электроды расположены по предполагаемой трассе сооружения, то измерительный щуп осциллографа должен быть подключен к электроду, направленному в сторону начала трассы. Электроды, установленные перпендикулярно, следует соединять так, чтобы "нижний" электрод подключался к измерительному щупу осциллографа, а "верхний" - к экрану осциллографа. При расположении электродов по второму варианту к измерительному щупу осциллографа подключаются электроды, ориентированные на юг и запад, а к экрану - на север и восток.

Если измеряемая разность потенциалов устойчива, т.е. не изменяется по значению и знаку, значит в земле присутствуют токи почвенного происхождения.

Если измеряемая разность потенциалов имеет неустойчивый характер, т.е. изменяется по значению и знаку или только по значению, это указывает на наличие блуждающих токов от посторонних источников.

Приложение Г  
(информационное)

"УТВЕРЖДАЮ"  
Главный инженер

\_\_\_\_\_  
наименование  
энергообъекта

\_\_\_\_\_  
подпись, ф.и.о.

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 200 \_\_\_\_  
г.

дата

**ПАСПОРТ  
НА ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ЭНЕРГООБЪЕКТА**

Дата ввода в  
эксплуатацию

Дата капитального ремонта  
(реконструкции)

Материал  
заземлителей

Профиль соединительных  
шин

Сечение соединительных  
шин

Глубина залегания шин  
заземлителей

Исполнительные схемы заземляющих устройств

Электромагнитная совместимость  
оборудования

Решение о пригодности заземляющего устройства к  
эксплуатации:

### Результаты проверки заземляющего устройства энергообъекта

N п.п.	Наименование объекта	Дата проверки	Сопrotивление растеканию тока, Ом	Сопrotивление растеканию тока без отходящих коммуникаций, Ом	Степень коррозии заземлителя	Пригодность к эксплуатации	Дата следующей проверки	Примечания

### Результаты проверки связей оборудования энергообъекта с искусственным заземлителем

N п.п.	Оборудование	Дата проверки	Наличие связи оборудования с заземляющим устройством	Сопrotивление связи между оборудованием по искусственному заземлителю, Ом	Степень коррозии, %	Пригодность заземлителя оборудования к эксплуатации	Дата следующей проверки	Примечания

### Результаты контрольных измерений напряжения прикосновения на энергообъекте

N п.п.	Наименование объекта	Дата проверки	Расчетный ток КЗ, кА	Время срабатывания защиты, с	Наибольшее значение напряжения прикосновения, В	Соответствие нормативным документам	Дата следующей проверки

### Сведения об изменениях после ремонта или реконструкции ЗУ

Перечень изменений	Вид работ (замена оборудования, ремонт, реконструкция)	Время проведения работ	Организация-исполнитель	Отметка о внесении изменений в исполнительную схему ЗУ

### Ведомость дефектов

N п.п.	Дата проверки	Оборудование или группа оборудования	Обнаруженные дефекты	Устранение дефектов		
				Организация-исполнитель	Отметка об устранении дефектов	Дата

**ПРОТОКОЛ  
ПРОВЕРКИ СОСТОЯНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**  
ПС \_\_\_\_\_  
наименование

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 200 \_\_\_\_  
г.

\_\_\_\_\_  
название предприятия

1. Цель  
измерений \_\_\_\_\_

2. Погодные  
условия \_\_\_\_\_

3. Средства  
измерений \_\_\_\_\_

4. Результаты проверки и измерений

4.1. Проверка металlosвязей, сечения элементов, контактных соединений,  
коррозионного состояния ЗУ

Место проверки	Характер неисправности

4.2. Определение реальной схемы ЗУ

4.2.1. Перечень незаземленного оборудования

Таблица Д1

Наименование оборудования	Характер неисправности

## 4.2.2. Результаты измерений сопротивления связи электрооборудования с ЗУ

Таблица Д2

Точки подключения источника питания		$I_{\text{изм}}, \text{А}$	$U_{\text{изм}}, \text{В}$	$Z_{\text{св}400}$ (с применением КДЗ-1)	$Z_{\text{св}50}$ $\frac{Z_{\text{свизм}}}{K_{\text{п}}}$
1	2				

Заключение \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 4.3. Измерение сопротивления ЗУ

Сопротивление ЗУ при заданном значении $r_{\text{ЭТ}}$		$r_{\text{ЭП}} / r_{\text{ЭТ}}$								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$R_{\text{изм}}, \text{Ом}$	$r_{\text{ЭТ}} =$									
	$r_{\text{ЭТ}} =$									
	$r_{\text{ЭТ}} =$									

Сопротивление ЗУ, определенное по зависимости

$$R_{\text{изм}} = f(r_{\text{эл}} / r_{\text{эт}}) \text{ _____, Ом.}$$

Сезонный коэффициент сопротивления  $K_c = \text{_____}$ .

Сопротивление ЗУ  $R_{\text{ЗУ}} = K_c R_{\text{изм}} = \text{_____}$ , Ом.

Заключение \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

#### 4.4. Проверка напряжения на ЗУ

Значение тока, стекающего с заземлителя в землю при однофазном замыкании на землю:

$$I_{\text{КЗ}} = \text{_____ кА.}$$

Напряжение на ЗУ:  $U_{\text{ЗУ}} = R_{\text{ЗУ}} I_{\text{КЗ}} = \text{_____ кВ.}$

Заключение \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

#### 4.5. Напряжение прикосновения на оборудовании (конструкциях) ОРУ

Ток замыкания на землю  $I_{\text{КЗ}} = \text{_____ кА.}$

Время отключения  $\tau = \text{_____ с.}$

Норма напряжения прикосновения \_\_\_\_\_ В.

№ п.п.	Место измерения	$R_{\text{ЗУ}} = U_{\text{изм}} / I_{\text{изм}}$ (по прибору)	$R_{\text{осн}}$ , кОм	$U_{\text{пр}}$ , В

Заключение \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок [Текст]. 6-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Правила устройств электроустановок [Текст]. 7-е изд. - М.: Изд-во НЦ ЭНАЦ, 2002. – 928 с.
3. Строительные нормы и правила. СНиП 3.05.06-85. Электротехнические устройства. Госстрой СССР, 1986.
4. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
5. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
6. ГОСТ Р 50571.1-93 (МЭК 364-1-72, МЭК 364-2-70). Электроустановки зданий. Основные положения.
7. ГОСТ Р 50571.2-94 (МЭК 364-3-93). Электроустановки зданий. Часть 3. Основные характеристики.
8. ГОСТ Р 50571.3-94 (МЭК 364-4-41-92). Требования по обеспечению безопасности. Защита от поражения электрическим током.
9. ГОСТ Р 50571.4-94 (МЭК 364-4-42-80). Требования по обеспечению безопасности. Защита от тепловых воздействий.
10. ГОСТ Р 50571.5-94 (МЭК 364-4-43-77). Требования по обеспечению безопасности. Защита от сверхтока.
11. ГОСТ Р 50571.6-94 (МЭК 364-4-45-84). Требования по обеспечению безопасности. Защита от понижения напряжения.
12. ГОСТ Р 50571.7-94 (МЭК 364-4-46-81). Требования по обеспечению безопасности. Отделение, отключение, управление.
13. ГОСТ Р 50571.8-94 (МЭК 364-4-47-81). Требования по обеспечению безопасности. Общие требования по применению мер защиты для обеспечения

безопасности. Требования по применению мер защиты от поражения электрическим током.

14. ГОСТ Р 50571.9-94 (МЭК 364-4-473-77). Требования по обеспечению безопасности. Применение мер защиты от сверхтоков.

15. ГОСТ Р 50571.10-96 (МЭК 364-5-54-80). Выбор и монтаж электрооборудования. Заземляющие устройства и защитные проводники.

16. Найфельд М.Р. Заземление, защитные меры электробезопасности [Текст]. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1971

17. Карякин Р.Н. Нормы устройства сетей заземления [Текст]. – М.: Энергосервис, 2002, 85с.

18. РД 153-34.0-20.525-00 Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок/ РАО "ЕЭС России"[Текст]. - М.: СПО ОРГРЭС, 2000.

19. [www.fluke.ru/comx/show\\_product.aspx](http://www.fluke.ru/comx/show_product.aspx)

20. [www.galmar.pl](http://www.galmar.pl)

21. [www.technological.ru](http://www.technological.ru)

22. [galmar.maxtrader.ru](http://galmar.maxtrader.ru)

23. [www.electronpribor.ru/goods](http://www.electronpribor.ru/goods)

24. [www.energoportal.ru](http://www.energoportal.ru)

## Содержание

Введение	3
Глава 1. Область применения, терминология, классификация, системы заземления электроустановок .....	5
§1.1. Область применения, терминология, классификация.....	5
§1.2. Системы заземления электроустановок.....	11
Глава 2. Требования по выполнению заземляющих устройств электроустановок разных напряжений.....	18
§2.1. Электроустановки напряжением выше 1 кВ сети с эффективно заземленной нейтралью.....	18
§ 2.2. Электроустановки напряжением выше 1 кВ сети с изолированной нейтралью.....	24
§2.3. Электроустановки напряжением до 1 кВ сети с заземленной нейтралью (система TN).....	28
Глава 3. Заземлители.....	37
§3.1. Удельное сопротивление земли.....	37
§3.2. Искусственные заземлители.....	40
§3.3. Естественные заземлители.....	45
§3.4. Коэффициент использования заземлителей.....	55
§3.5. Лучевые заземлители.....	59
§3.6. Углубленные горизонтальные заземлители.....	60
§3.7. Заземляющая система тросы-опоры.....	62
§3.8. Термическая устойчивость и механическая прочность заземлителей.....	63
§3.9. Заземлители для защиты от грозových перенапряжений.....	65
§3.10. Заземлители в местностях с высоким удельным сопротивлением земли.....	66
§3.11. Монтаж заземлителей.....	71
Глава 4. Расчет заземлителей.....	75
§4.1. Основные положения.....	75

§4.2. Расчет простых заземлителей.....	75
§4.3. Расчет сложных заземлителей.....	91
4.3.1. Расчет по допустимому сопротивлению заземлителя.....	94
4.3.2. Расчет по допустимому напряжению прикосновения.....	98
§4.4. Выносные заземлители.....	109
Глава 5. Проверка, испытания и сдача работ.....	112
§5.1. Измерение электрического сопротивления земли.....	112
§5.2. Измерение сопротивления заземляющих устройств.....	116
§5.3. Измерение напряжения прикосновения.....	122
§5.4. Меры безопасности при контроле ЗУ .....	129
§5.5. Документация на ЗУ электроустановки.....	130
§5.6. Рекомендации по ремонту и усилению ЗУ.....	131
Приложение А (информационное) Протокол испытания заземляющего устройства.....	134
Приложение Б (информационное) Пример определения реальной схемы ЗУ с помощью измерительного комплекса КДЗ-1 .....	136
Приложение В (информационное) Выбор сезонного коэффициента, измерение электрохимического потенциала и определение наличия блуждающих токов.....	139
Приложение Г (информационное) Паспорт на заземляющее устройство энергообъекта.....	146
Приложение Д (информационное) Протокол проверки состояния заземляющего устройства.....	149
Библиографический список.....	152