

**О.М. Крестелёв,
Е.Г. Малюк**

Р А С Ч Ё Т ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ

**Учебно-методическое пособие
к расчётно-графической работе**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

О.М. Крастелёв, Е.Г. Малюк

РАСЧЁТ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ

**Учебно-методическое пособие
к расчётно-графической работе**

Севастополь
СевГУ
2025

УДК 621.316.99(076)

ББК 31.279-044я73

К78

Р е ц е н з е н т ы :

Б.А. Якимович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников»

Института ядерной энергии и промышленности
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

В.В. Кувшинов – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников»

Института ядерной энергии и промышленности
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Крастелев, О.М.

К78 Расчёт защитного заземления: учебно-методическое пособие к расчётно-графической работе / О.М. Крастелев, Е.Г. Малюк; Севастопольский государственный университет. – Севастополь: СевГУ, 2025. – 61 с. – Текст : электронный.

Подготовлено согласно рабочей программе дисциплины «Электробезопасность». Приведён расчёт системы заземления высоковольтной подстанции.

Рекомендовано для студентов направления 13.03.02 «Электротехника и электроэнергетика» профиля «Электроснабжение» дневного и заочного отделений.

УДК 621.316.99 (076)

ББК 31.279-044я73

Рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании учёного совета Института ядерной энергии и промышленности, протокол № 10 от 30 июня 2025 г.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Защитное заземление	6
1.1. Назначение, принцип действия и область применения защитного заземления	6
1.2. Виды заземляющих устройств	8
1.3. Выполнение заземляющих устройств	12
2. Расчет защитного заземления	24
3. Исходные данные для расчета защитного заземления	26
4. Определение расчетного тока замыкания на землю	27
5. Определение требуемого правилами сопротивления заземляющего устройства	28
6. Определение требуемого сопротивления искусственного заземлителя	31
7. Уточнение параметров заземлителя	32
Пример расчёта 1. Расчёт заземлителя в однородной земле методом коэффициентов использования по допустимому сопротивлению	37
Пример расчёта 2. Расчёт сложного заземлителя в двухслойной среде	42
Приложения	48
Варианты заданий	59
Литература	61

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Электробезопасность» предназначен для подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и включает в себя кроме лекций, практических занятий и лабораторных работ самостоятельное выполнение расчётно-графической работы «Расчёт защитного заземления».

Электроэнергетика – это основа современного мира. Электрическая энергия является основным видом энергии используемой человечеством практически во всех сферах деятельности и этому есть, по крайней мере, три причины. Первая причина – многообразие источников и технологий получения электрической энергии, вторая причина – относительная простота передачи электроэнергии на большие расстояния и, наконец, третья причина – лёгкость преобразования электрической энергии в другие виды энергии, что позволяет использовать электрическую энергию как основную или вспомогательную во всех видах человеческой деятельности.

Однако производство, передача и использование электрической энергии сопровождается достаточно высокой опасностью поражения персонала электрическим током.

По этой причине обращение с электрической энергией потребовало разработку мер безопасности направленных на минимизацию вероятности поражения электрическим током как производственного персонала, работающего с оборудованием и приборами, использующими электрическую энергию, так и обычных потребителей.

Масштабы и интенсивность использования электрической энергии в человеческой деятельности потребовали разработку организационных и технических мероприятий по обеспечению безопасности производства и использования электроэнергии, которые стали основой электробезопасности.

Одним из основных технических мероприятий по обеспечению электробезопасности является устройство защитного заземления, которое предназначено для устранения опасности поражения электрическим током при прикосновении к корпусу электроустановки и её нетоковедущим проводящим частям, оказавшимся под напряжением вследствие замыкания на корпус, а также срабатывания защиты электротехнического оборудования при возникновении аварийной ситуации.

Кроме того, к системе защитного заземления присоединяются технические средства защиты электрооборудования от импульсных перенапряжений, вызванных разрядами молний, штатными и аварийными срабатываниями высоковольтных выключателей и разъединителей, а также аварийным срабатыванием РЗА.

Проектирование защитного заземления представляет собой достаточно сложную задачу в связи с многообразием функций, выполняемых защитным заземлением в системах электроснабжения и в связи с необходимостью учёта природных факторов при выполнении расчётов.

Предлагаемое учебно-методическое пособие «Расчёт защитного заземления» предназначено для систематизации знаний, полученных при прослушивании и проработке лекций, выполнении лабораторных работ и проведении практических занятий по устройству заземления, путём самостоятельного выполнения расчёта защитного заземления.

1. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ

1.1 Назначение, принцип действия и область применения защитного заземления

Защитное заземление - преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам (индуктивное влияние соседних токоведущих частей, вынос потенциала, разряд молнии и т. п.).

Эквивалентом земли может быть вода реки или моря, каменный уголь в коренном залегании и т. п.

Назначение защитного заземления - устранение опасности поражения током в случае прикосновения к корпусу электроустановки и другим нетоковедущим металлическим частям, оказавшимся под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам.

Защитное заземление следует отличать от рабочего заземления и заземления молниезащиты.

Рабочее заземление - преднамеренное соединение с землей отдельных точек электрической цепи, например нейтральных точек обмоток генераторов, силовых и измерительных трансформаторов, дугогасящих аппаратов, реакторов поперечной компенсации в дальних линиях электропередачи, а также фазы при использовании земли в качестве фазного или обратного провода.

Рабочее заземление предназначено для обеспечения надлежащей работы электроустановки в нормальных или аварийных условиях и осуществляется непосредственно (т. е. путем соединения проводником заземляемых частей с заземлителем) или через специальные аппараты - пробивные предохранители, разрядники, резисторы и т. п.

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

Принцип действия защитного заземления - снижение до безопасных значений напряжений прикосновения и шага, обусловленных замыканием на корпус и другими причинами. Это достигается путем

уменьшения потенциала заземленного оборудования (уменьшением сопротивления заземлителя), а также путем выравнивания потенциалов основания, на котором стоит человек, и заземленного оборудования (подъемом потенциала основания, на котором стоит человек, до значения, близкого к значению потенциала заземленного оборудования).

Область применения защитного заземления:

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

2) *сети напряжением выше 1000 В* переменного и постоянного тока с любым режимом нейтральной или средней точки обмоток источников тока (рис. 1).

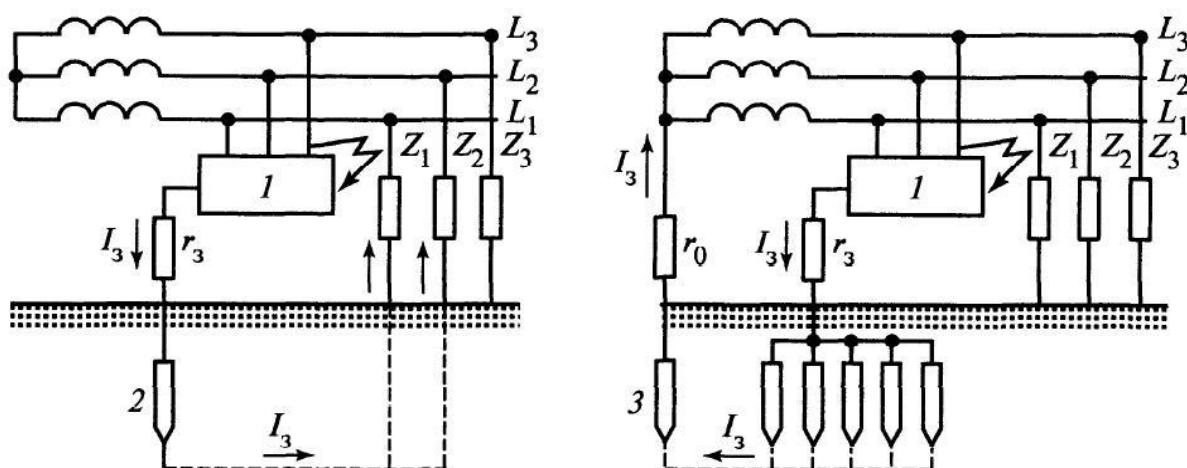


Рис. 1. Принципиальные схемы защитного заземления в сетях трехфазного тока:
а - в сети с изолированной нейтралью до 1000 В; б - в сети с заземленной нейтралью выше 1000 В; 1 - заземленное оборудование; 2 - заземлитель защитного заземления; 3 - заземлитель рабочего заземления; r_0 , r_3 - сопротивления рабочего и защитного заземлений

Защитное заземление является наиболее простой и в то же время весьма эффективной мерой защиты от поражения током при появлении напряжения на металлических нетоковедущих частях.

1.2 Виды заземляющих устройств

Заземляющим устройством называется совокупность **заземлителя** - проводников (электродов), соединенных между собой и находящихся в непосредственном соприкосновении с землей, и **заземляющих проводников**, соединяющих заземляемые части электроустановки с заземлителем.

В зависимости от места размещения заземлителя относительно заземляемого оборудования различают два типа заземляющих устройств: выносное и контурное.

Выносное заземляющее устройство (рис. 2) характеризуется тем, что заземлитель его вынесен за пределы площадки, на которой размещено заземляемое оборудование, или сосредоточен на некоторой части этой площадки. Поэтому выносное заземляющее устройство называют также **сосредоточенным**.

Существенный недостаток выносного заземляющего устройства - отдаленность заземлителя от защищаемого оборудования, вследствие чего на всей или на части защищаемой территории коэффициент прикосновения $\alpha = 1$.

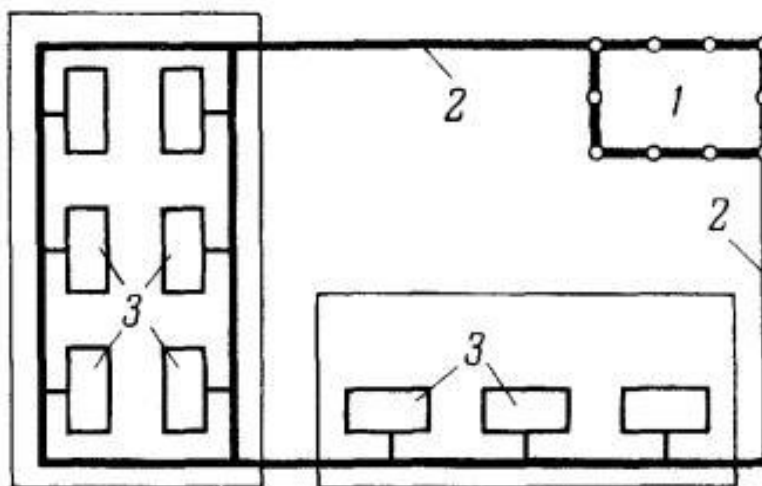


Рис. 2. Выносное заземляющее устройство:
1 - заземлитель 2 - заземляющие проводники (магистраль),
3 - заземляемое оборудование

Поэтому заземляющие устройства этого типа применяются лишь при малых токах замыкания на землю, в частности в установках до 1000 В, где потенциал заземлителя не превышает значения допустимого напряжения

прикосновения $U_{\text{пр.доп}}(B)$ (с учетом коэффициента напряжения прикосновения, учитывающего падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек α_2):

$$\varphi_3 = I_3 \cdot R_3 \leq \frac{U_{\text{пр.доп}}}{\alpha_2} . \quad (1)$$

Кроме того, при большом расстоянии до заземлителя может значительно возрасти сопротивление заземляющего устройства в целом за счет сопротивления соединительного, т. е. заземляющего, проводника.

Достоинством выносного заземляющего устройства является возможность выбора места размещения электродов заземлителя с наименьшим сопротивлением грунта (сырое, глинистое, в низинах и т. п.).

Необходимость в устройстве выносного заземления может возникнуть в следующих случаях: при невозможности по каким-либо причинам разместить заземлитель на защищаемой территории; при высоком сопротивлении земли на данной территории (например, песчаный или скалистый грунт) и наличии вне этой территории мест со значительно лучшей проводимостью земли; при рассредоточенном расположении заземляемого оборудования (например, в горных выработках) и т. п.

Контурное заземляющее устройство характеризуется тем, что электроды его заземлителя размещаются по контуру (периметру) площадки, на которой находится заземляемое оборудование, а также внутри этой площадки. Часто электроды распределяются на площадке по возможности равномерно, и поэтому контурное заземляющее устройство называется также **распределенным**.

Безопасность при распределенном заземляющем устройстве может быть обеспечена не только уменьшением потенциала заземлителя, а и выравниванием потенциала на защищаемой территории до такого значения, чтобы максимальные напряжения прикосновения и шага не превышали допустимых значений. Это достигается путем соответствующего размещения одиночных заземлителей на защищаемой территории.

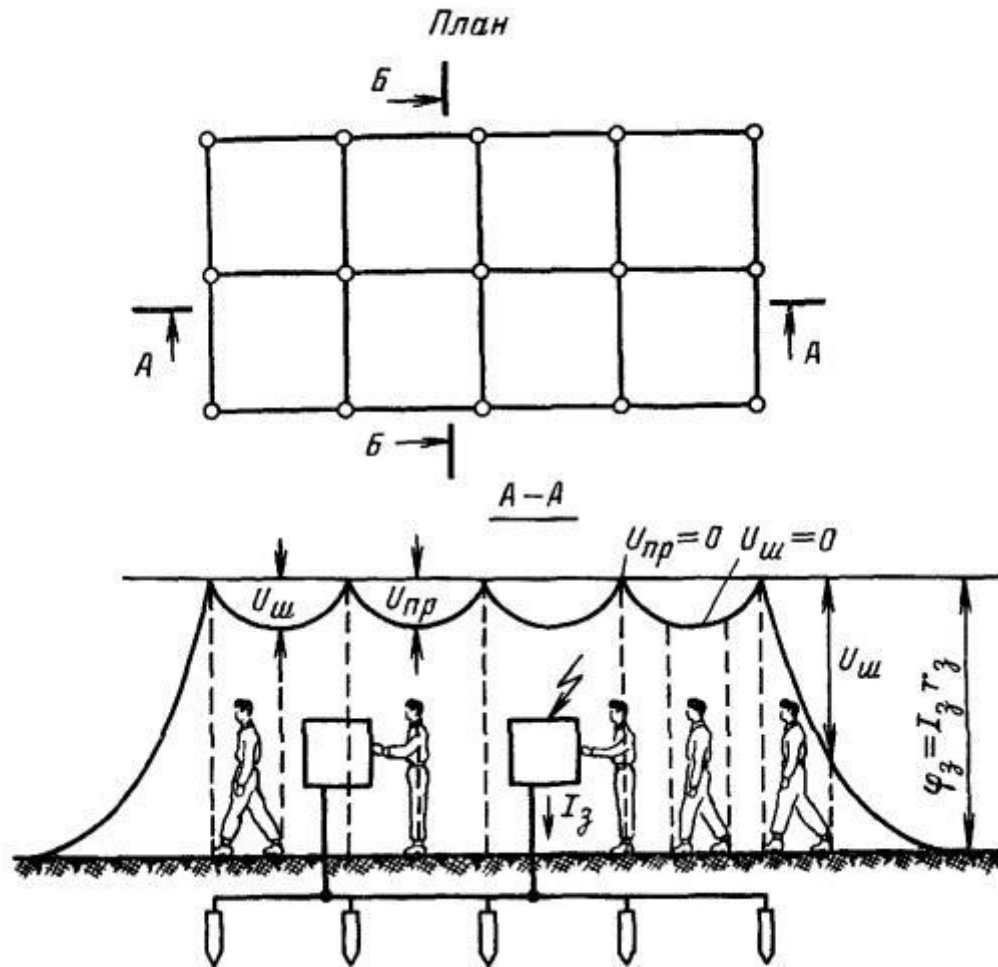


Рис. 3а. Контурное заземляющее устройство. Вид А-А
 $U_{пр}$, $U_{ш}$ - напряжения прикосновения и шага, φ_3 - потенциал заземлителя,
 I_3 - ток стекающий в землю через заземлитель, r_3 - сопротивление заземлителя
 растеканию тока

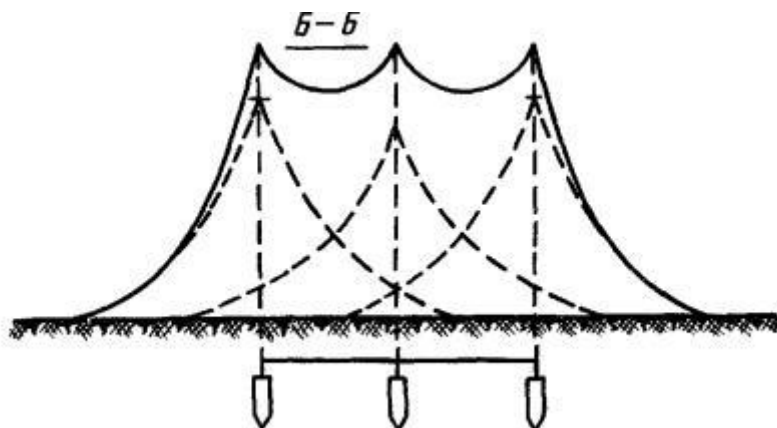


Рис. 3б. Контурное заземляющее устройство. Вид Б-Б

В качестве примера на рис. 3 показано распределение потенциала в момент замыкания фазы на заземленный корпус на открытой подстанции, имеющей контурное заземление.

Как видно из рисунка, изменение потенциала в пределах площадки, на которой размещены электроды заземлителя, происходит плавно; при этом напряжение прикосновения и напряжение шага $U_{ш}$ имеют небольшие значения по сравнению с потенциалом заземлителя.

Однако за пределами контура по его краям наблюдается крутой спад потенциала ϕ . Чтобы исключить в этих местах опасные напряжения шага, которые особенно высоки при больших токах замыкания на землю, по краям контура за его пределами, в первую очередь в местах проходов и проездов, укладывают в землю на различной глубине дополнительные стальные полосы, соединенные с заземлителем. Благодаря этому спад потенциала в этих местах происходит по пологой кривой (рис. 4).

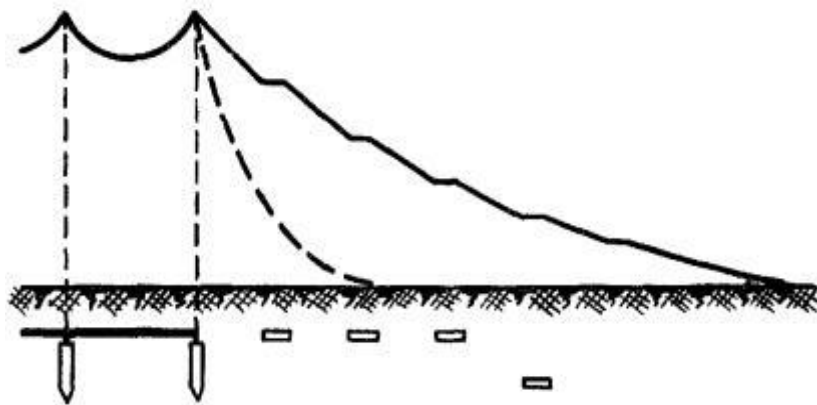


Рис. 4. Пример размещения дополнительных стальных полос в земле у края контура заземлителя за его пределами для снижения напряжения шага

Внутри помещений выравнивание потенциала происходит естественным путем благодаря металлическим конструкциям, трубопроводам, кабелям и подобным им проводящим предметам, связанным с разветвленной сетью заземления. Арматура железобетонных зданий также оказывает благоприятное влияние на выравнивание потенциала.

1.3 Выполнение заземляющих устройств

а) Заземлители

Различают заземлители искусственные, предназначенные исключительно для целей заземления, и естественные - находящиеся в земле металлические предметы иного назначения.

Для искусственных заземлителей применяют обычно вертикальные и горизонтальные электроды.

В качестве *вертикальных электродов* используют стальные трубы диаметром 5 - 6 см с толщиной стенки не менее 3,5 мм и угловую сталь с толщиной полки не менее 4 мм (обычно это угловая сталь размером от 40х40 до 60х60 мм) отрезками длиной 2,5 - 3,0 м. Широкое применение находит также прутковая сталь диаметром не менее 10 мм, длиной до 10 м, а иногда и более.

Для связи вертикальных электродов и в качестве самостоятельного *горизонтального электрода* применяют полосовую сталь сечением не менее 4х12 мм и сталь круглого сечения диаметром не менее 6 мм.

Размещение электродов выполняют в соответствии с проектом. Заземлители не следует размещать вблизи горячих трубопроводов и других объектов, вызывающих высыхание почвы, а также в местах, где возможна пропитка грунта нефтью, маслами и т. п., поскольку в таких местах сопротивление грунта резко возрастает.

Для установки вертикальных заземлителей предварительно роют траншею глубиной 0,7 - 0,8 м, после чего трубы или уголки забивают механизмами - копрами, гидропрессами и т. п. (рис. 5). Стальные стержни диаметром 10 - 12 мм, длиной 4 - 4,5 м ввертывают в землю с помощью специальных приспособлений, а более длинные заглубляют вибраторами.

Верхние концы погруженных в землю вертикальных электродов соединяют стальной полосой на сварке. При этом полосу устанавливают на ребро, так как в таком положении ее удобнее приварить к вертикальным электродам, и она имеет лучший контакт с землей.

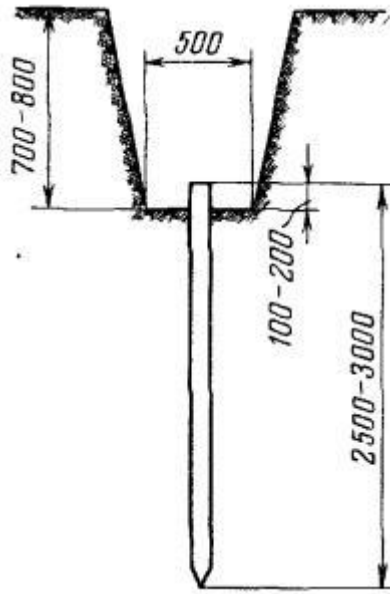


Рис. 5. Установка стержневого электрода в траншее

В таких же траншеях прокладывают и горизонтальные электроды. В этом случае электроды из полосовой стали также рекомендуется ставить на ребро.

Траншеи засыпают землей, очищенной от щебня и строительного мусора, с последующей тщательной трамбовкой, что снижает сопротивление растеканию заземлителя, а следовательно, дает экономию металла.

Искусственные заземлители могут быть выполнены также из электропроводящего бетона.

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

В качестве естественных заземлителей подстанций и распределительных устройств (РУ) рекомендуется использовать заземлители опор отходящих воздушных линий электропередачи,

соединенные с помощью грозозащитных тросов линий с заземляющим устройством подстанции или РУ.

В последние годы в качестве естественных заземлителей начали использовать железобетонные фундаментные элементы опор воздушных линий электропередачи. Благодаря капиллярному подсосу влаги защитный слой бетона указанных конструкций обретает проводимость, близкую к проводимости окружающих слоев земли, что обеспечивает стабильные значения сопротивления растеканию металлической арматуры, играющей роль электродов заземлителя опоры.

Естественные заземлители обладают, как правило, малым сопротивлением растеканию тока, и поэтому использование их для заземления дает весьма ощутимую экономию металла. Естественные заземлители можно использовать без искусственных, если они обеспечивают требуемое ПУЭ сопротивление растеканию тока.

Недостатками естественных заземлителей являются доступность некоторых из них неэлектротехническому персоналу и возможность нарушения непрерывности соединения протяженных заземлителей (при ремонтных работах и т. п.).

Устройство заземлителей в плохо проводящих грунтах встречает серьезные трудности по условиям обеспечения определенного сопротивления растеканию R_z . Поэтому ПУЭ допускают для таких установок повышенное значение сопротивления заземляющих устройств вплоть до десятикратного установленного сопротивления (для районов с удельным сопротивлением земли более 500 Ом·м). Тем не менее, часто приходится прибегать к специальным мерам для снижения R_z , в частности применять глубинные заземлители, производить укладку вокруг электродов грунта с повышенной проводимостью или специальную обработку почвы, делать заземления выносными и т. п.

Глубинные заземлители - стальные стержни длиной 10 - 12 м и более - позволяют иногда достигнуть слоев земли с хорошей проводимостью; эти заземлители применяют, в частности, в песчаных грунтах, а также в районах вечной мерзлоты. В последнем случае глубинные заземлители дополняют протяженными, прокладываемыми на глубине около 0,5 м и

предназначенными для работы в летнее время, когда верхний слой земли оттаивает и, следовательно, имеет хорошую проводимость.

Укладка вокруг электродов грунта с повышенной проводимостью дает хорошие результаты в скальных структурах, где прокладывают, как правило, лишь горизонтальные электроды. В этом случае вокруг электродов укладывают влажную глину с последующей трамбовкой и засыпкой щебнем поверх траншеи.

В подобных условиях и для укладки вокруг вертикальных заземлителей весьма успешно может применяться бентонит (бентонит - коллоидная глина, состоящая в основном из минералов группы монтмориллонита), обладающий малым удельным сопротивлением (не более 10 Ом·м), хорошо удерживающий влагу и не вызывающий коррозии заземлителей. Его применяют в виде вязкой тестообразной массы (одна часть бентонита на 10 - 12 частей воды).

Обработка почвы, как и укладка грунта с повышенной проводимостью, производится обычно вокруг электродов, поскольку, как известно, основное сопротивление току оказывают ближайшие к электроду слои грунта.

Материалом для обработки может служить, в частности, поваренная соль, предварительно растворенная в воде. Соль значительно снижает сопротивление грунта. Так, при добавлении 0,1 % соли к массе влаги, содержащейся в суглинке, удельное сопротивление его снижается на 60 – 80 %. Однако соль вызывает интенсивную коррозию заземлителей и может вымываться из грунта атмосферными осадками.

Устройство выносных заземлителей является часто наиболее эффективным и экономически приемлемым решением. В этом случае заземлители размещают на участках с хорошо проводящим грунтом, укладывают (забивают) на дно непромерзающих рек, озер или морей, размещают в артезианских скважинах и т. п.

Однако выносные заземлители целесообразно сооружать при наличии мест с меньшим удельным сопротивлением земли не далее 2 км от участка, на котором размещено заземляемое оборудование.

В районах вечной мерзлоты применяют также рудные, таликовые и другие выносные заземлители.

Заземлитель рудного типа – это электроды, размещенные в зоне залегания рудной жилы.

б) Заземляющие проводники

В качестве **заземляющих проводников**, предназначенных для соединения заземляемых частей с заземлителями, применяют, как правило, полосовую сталь и сталь круглого сечения.

Сечение заземляющих проводников в электроустановках напряжением выше 1000 В с эффективно заземленной нейтралью (заземленной через малое сопротивление) определяется их термической стойкостью при прохождении по ним наибольших токов однофазного замыкания на землю. При этом кратковременный нагрев проводников, соответствующий времени действия основной релейной защиты и полному времени отключения выключателя, не должен превышать 400 °С.

В сетях напряжением до и выше 1000 В с изолированной нейтралью заземляющие проводники должны обладать проводимостью не менее 1/3 проводимости фазных проводников, а сечение их не должно быть меньше установленного ПУЭ. Например, наименьшее сечение стальной прямоугольной шины составляет 24 мм² при прокладке ее внутри здания и 48 мм² при прокладке вне здания или в земле; для круглой стали наименьший диаметр равен 5 мм при прокладке в зданиях, 6 мм - в наружных установках, 10 мм - в земле.

В производственных помещениях с электроустановками напряжением до и выше 1000 В магистрали заземления (заземляющий проводник с двумя или более ответвлениями) из стальной полосы должны иметь сечение не менее 100 мм². Допускается применение стали круглого сечения той же проводимости. Во всех случаях применения медных проводников сечение их должно быть не более 25 мм², алюминиевых - не более 35 мм² и стальных - не более 120 мм².

Рекомендуется в целях экономии металла использовать в качестве заземляющих проводников так называемые **естественные проводники** - металлические конструкции зданий и сооружений: фермы, колонны, подкрановые пути, каркасы распределительных устройств, шахты подъемников, лифтов и элеваторов, а также обрамления каналов, стальные трубы электропроводок, алюминиевые оболочки кабелей, металлические

кожухи и опорные конструкции шинопроводов, металлические стационарные открыто проложенные трубопроводы всех назначений (кроме трубопроводов горючих и взрывоопасных веществ и смесей, канализации и центрального отопления).

Прокладка заземляющих проводников производится открыто по конструкциям зданий, в том числе по стенам. При этом в помещениях сухих без агрессивной среды заземляющие проводники допускается прокладывать непосредственно по стенам. Во влажных, сырых и особо сырых помещениях, а также в помещениях с агрессивной средой заземляющие проводники следует прокладывать на расстоянии не менее 10 мм от стен.

В наружных установках и помещениях магистрали заземления и ответвления от них должны быть доступны для осмотра. Это требование не распространяется на оболочки кабелей, арматуру железобетонных конструкций, а также на заземляющие проводники, проложенные в трубах, коробах и непосредственно в теле строительных конструкций (замоноличенные).

Ответвления от магистралей к электроприемникам напряжением до 1000 В допускается прокладывать скрыто непосредственно в стене под чистым полом и т. п. с предварительной защитой их от воздействия агрессивных сред. Такие ответвления не должны иметь соединений. В наружных установках заземляющие проводники допускается прокладывать в земле, в полу, а также по краю площадок фундаментов технологических установок и т. п.

Присоединение заземляемого оборудования к магистрали заземления осуществляется с помощью отдельных проводников. При этом последовательное включение заземляемого оборудования не допускается (рис. 6).

Заземление отдельных электродвигателей, аппаратов и другого оборудования, установленных непосредственно на металлических станках и имеющих с металлом станков надежный контакт, может осуществляться путем присоединения станины станков к заземляющей магистрали.

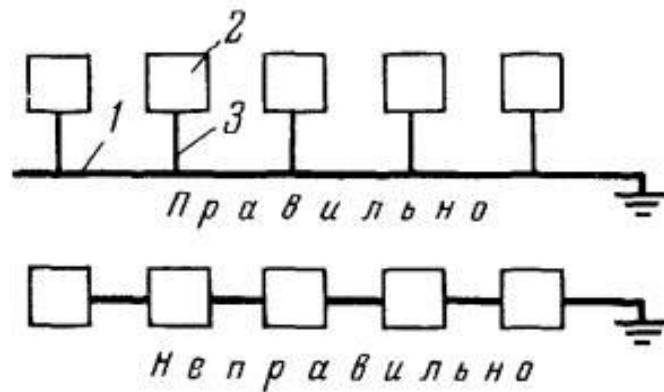


Рис. 6. Схема присоединения заземляемых объектов к заземляющей магистрали:

- 1 - заземляющая магистраль, 2 - заземляемое оборудование,
3 - проводник - ответвление от заземляющей магистрали

Соединения заземляющих проводников между собой, а также с заземлителями и заземляемыми конструкциями выполняются, как правило, сваркой, а с корпусами аппаратов, машин и другого оборудования - сваркой или с помощью болтов. При этом присоединение заземляющей магистрали к заземлителю - искусственному или естественному - выполняется в двух местах.

в) Оборудование, подлежащее защитному заземлению

Защитному заземлению подлежат металлические нетоковедущие части электрооборудования, которые вследствие неисправности изоляции и других причин могут оказаться под напряжением и к которым возможно прикосновение людей и животных.

В помещениях с повышенной опасностью и особо опасных, а также в наружных установках заземление обязательно при номинальном напряжении электроустановки выше 42 В переменного и 110 В постоянного тока, а в помещениях без повышенной опасности - при напряжении 380 В и выше переменного и 440 В и выше постоянного тока. Лишь во взрывоопасных зонах всех классов заземление выполняется независимо от значения напряжения электроустановки.

В частности, защитному заземлению подлежат:

1) металлические корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, светильников, передвижных и переносных электроприемников пусковых и регулировочных реостатов и т. п.;

2) приводы электрических аппаратов - разъединителей, отделителей, выключателей и т. п.;

3) каркасы распределительных щитов, щитов управления, щитков и шкафов, а также их съемные или открывающиеся части, если на них установлено электрооборудование напряжением выше 42 В переменного тока или выше 110 В постоянного тока;

4) металлические конструкции распределительных устройств, кабельные конструкции, кабельные соединительные муфты, оболочки и броня контрольных и силовых кабелей, оболочки проводов, рукава и трубы электропроводок, кожухи и опорные конструкции шинопроводов, лотки, короба, струны, тросы и стальные полосы, на которых укреплены кабели и провода (кроме струн, тросов и полос, по которым проложены кабели с заземленной или зануленной металлической оболочкой или броней), а также другие металлические конструкции, на которых устанавливается электрооборудование;

5) металлические оболочки и броня контрольных и силовых кабелей и проводов напряжением до 42 В переменного и до 110 кВ постоянного тока, проложенных на общих металлических конструкциях, в том числе в общих трубах, коробах, лотках и т. п. с кабелями и проводами, металлические оболочки и броня которых подлежат заземлению;

6) электрооборудование, размещенное на движущихся частях станков, машин и механизмов;

7) железобетонные и металлические опоры воздушных линий (ВЛ) электропередачи напряжением 3 - 35 кВ и опоры, на которых установлены силовые или измерительные трансформаторы, разъединители, предохранители или другие аппараты; крюки и штыри фазных проводов, устанавливаемых на железобетонных опорах ВЛ напряжением до 1000 В, а также арматура этих опор.

В целях уравнивания потенциалов в тех помещениях и наружных установках, в которых применяют заземление, строительные и производственные конструкции, стационарно проложенные трубопроводы всех назначений, металлические корпуса технологического оборудования, подкрановые и железнодорожные рельсовые пути и т. п. должны быть

присоединены к сети заземления. При этом достаточно естественных контактов в сочленениях.

Защитному заземлению не подлежат:

1) корпуса электрооборудования, аппаратов и электромонтажных конструкций, установленных на заземленных металлических конструкциях, распределительных устройствах, на щитах, шкафах, щитках, станинах станков, машин и механизмов, при условии обеспечения надежного электрического контакта с заземленными основаниями;

2) конструкции, указанные в перечне частей, подлежащих заземлению, при условии надежного электрического контакта между этими конструкциями и установленным на них заземленным электрооборудованием.

При этом указанные конструкции не могут быть использованы для заземления размещенного на них другого электрооборудования;

3) арматура изоляторов всех типов, оттяжек, кронштейнов и осветительной арматуры при установке их на деревянных опорах воздушных линий электропередачи или на деревянных конструкциях открытых подстанций, если это не требуется по условиям защиты от атмосферных перенапряжений.

При прокладке кабеля с металлической заземленной оболочкой или неизолированного заземляющего проводника на деревянной опоре перечисленные части, расположенные на этой опоре, заземляются;

4) съемные или открывающиеся части металлических каркасов камер распределительных устройств, шкафов, ограждений и т. п., если на этих частях не установлено электрооборудование или если напряжение установленного электрооборудования не превышает 42 В, переменного или 110 В постоянного тока;

г) Связь между заземляющими устройствами нескольких аналогичных установок и установок разных напряжений и назначений

Защитные заземляющие устройства аналогичных электроустановок, получающих энергию от одной и той же сети с изолированной нейтралью, целесообразно соединять электрически или выполнять их как одно целое устройство. Поскольку при замыкании на

корпус разных фаз в двух установках, имеющих отдельные заземляющие устройства (рис. 7), возникает двойное замыкание на землю и заземленное оборудование оказывается под напряжением относительно земли, В:

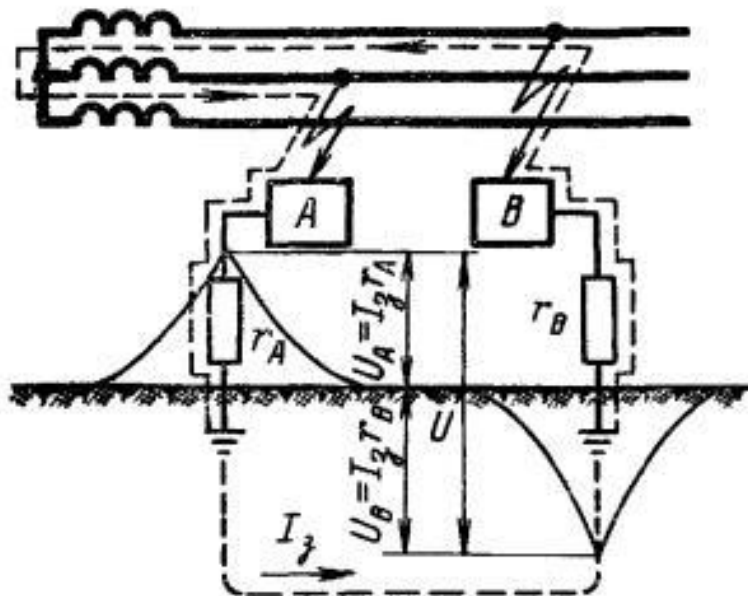


Рис. 7. Двойное замыкание на землю при раздельном заземлении установок, питающихся от одной сети с изолированной нейтралью

В установке А:

$$U_A = I_3 \cdot R_A = \frac{U}{R_A + R_B} \cdot R_A.$$

В установке В:

$$U_B = I_3 \cdot R_B = \frac{U}{R_A + R_B} \cdot R_B,$$

где U - линейное напряжение сети, В;

R_A , R_B - сопротивления заземляющих устройств установок А и В соответственно, Ом.

При этом $U_A + U_B = U$, а при равенстве R_A и R_B напряжения, возникшие на заземленном оборудовании обеих установок, оказываются одинаковыми:

$$U_A = U_B = 0,5 U.$$

Такое напряжение на заземленных элементах установок опасно в отношении поражения током, тем более что двойное замыкание в этом случае может существовать длительно.

Если же заземляющие устройства установок *A* и *B* соединить с помощью металлических шин или заземлители их выполнить как одно целое, то двойное замыкание на землю превратится в КЗ между фазами, что вызовет быстрое отключение электроустановок от сети максимальной токовой защитой, т.е. обеспечит кратковременность аварийного режима.

Вместе с тем в течение аварийного периода резко уменьшится напряжение на оборудовании, так как при этом значительно увеличится падение напряжения в сопротивлениях обмоток трансформатора и фазных проводов вследствие прохождения через них большого тока КЗ.

При невозможности соединить заземляющие устройства (из-за больших расстояний и по другим причинам) необходимо оснастить эти установки релейной защитой от однофазных или двойных замыканий на землю.

Защитные заземляющие устройства установок разных напряжений, например до 1000 В и выше, вследствие разных значений токов замыкания на землю, проходящих через них, оказываются в аварийный период под разными потенциалами. На заземленных частях установок напряжением до 1000 В возникающий потенциал не превышает нескольких десятков вольт, а на заземленных частях установок напряжением выше 1000 В он может достигать нескольких киловольт. Это обстоятельство делает целесообразным сооружение отдельных заземляющих устройств для установок разных напряжений.

Однако наличие в одном цехе или на одной площадке оборудования разного номинального напряжения вынуждает размещать заземляющие проводники разных заземляющих устройств по соседству либо на одних и тех же или связанных конструкциях. Вследствие этого в обычных условиях практически невозможно избежать непреднамеренных соединений между этими проводниками.

В редких случаях, когда необходимая изоляция достигнута, возникает угроза поражения человека из-за возможности одновременного прикосновения в аварийный период к двум предметам, связанным с

разными заземляющими устройствами и обладающими поэтому разными потенциалам. По указанным причинам заземляющие устройства установок разных напряжений, размещаемых на одной территории, выполняют совместно, как одно целое.

Заземление молниеотводов обычно выполняют совместно с защитным и рабочим заземлением электрооборудования. Исключение составляют отдельно стоящие или изолированные от здания молниеотводы, такими молниеотводами защищают здания и сооружения первой категории, т. е те, в которых находятся взрывчатые вещества, длительно сохраняются или систематически образуются смеси газов, паров или пыли с воздухом, способные взорваться от электрической искры с разрушительными последствиями или с человеческими жертвами, заземлители таких молниеотводов должны быть обособлены от заземлителей других назначений, а элементы их размещены на определенном расстоянии от защищаемого объекта.

Эти требования обусловлены необходимостью исключить занос в защищаемый объект потенциалов, которые вследствие больших токов молнии достигают высоких значений (десятков и сотен тысяч вольт) и могут явиться причиной взрывов и пожаров.

Электрические станции, подстанции и промышленные предприятия, не относящиеся по условиям молниезащиты к первой категории, защищают от прямых ударов молнии молниеотводами, размещаемыми обычно на защищаемых сооружениях, а иногда и отдельно стоящими молниеотводами.

Во всех указанных случаях молниеотводы присоединяют к общему заземлителю, сопротивление которого, как правило, удовлетворяет и требованиям молниезащиты. Тем не менее, в месте установки молниеотводов устраивают местный заземлитель из двух-трех электродов, соединенных стальной полосой.

Сети защитного заземления и зануления, т. е. заземляющие и нулевые защитные проводники, а также заземлители, являющиеся принадлежностью двух электрических сетей, питающихся от отдельных трансформаторов (один с изолированной, другой с глухозаземленной нейтралью), могут быть общими при любых напряжениях установок. При

этом системы заземления и зануления работают независимо друг от друга, хотя аварийные токи их протекают по одним и тем же защитным проводникам и общему заземлителю (рис. 8).

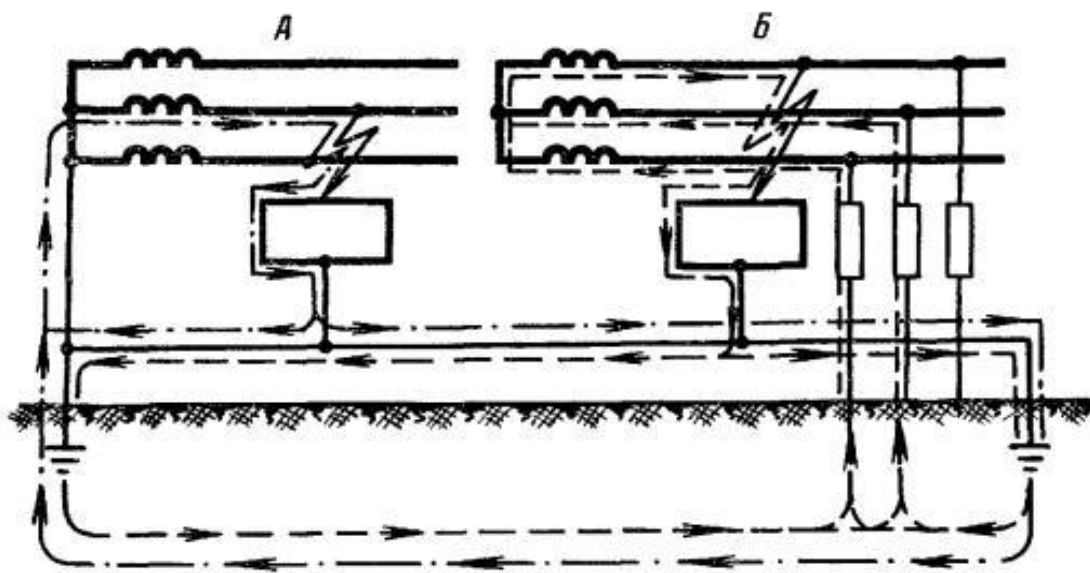


Рис. 8. Совместное использование заземляющих устройств для двух сетей:
А - до 1000 В с системой зануления, Б - до 1000 В или выше
с системой защитного заземления

2. Расчет защитного заземления

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

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

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

При расчете заземлителей в многослойной земле обычно принимают двухслойную модель земли с удельными сопротивлениями верхнего и нижнего слоев ρ_1 и ρ_2 соответственно и толщиной (мощностью) верхнего слоя h_1 (рис. 9).

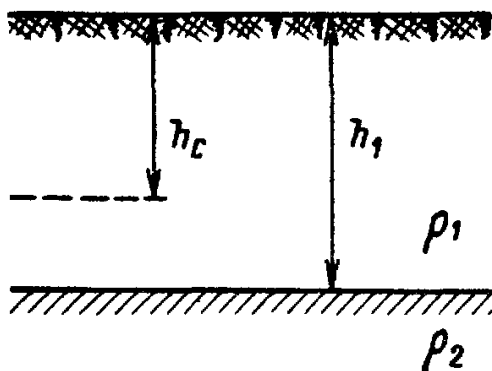


Рис. 9. Двухслойная модель земли:

ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев земли;

h_1 – мощность (толщина) верхнего слоя;

h_c – мощность слоя сезонных изменений

Расчет производится способом, основанным на учете потенциалов, наведенных на электроды, входящие в состав группового заземлителя, и называемым поэтому способом наведенных потенциалов. Расчет заземлителей в многослойной земле более трудоемок, но зато дает более точные результаты. Его целесообразно применять при сложных конструкциях групповых заземлителей, что обычно имеет место в электроустановках с эффективно заземленной нейтралью, т. е. в установках напряжением 110 кВ и выше.

Расчет заземлителей как в однородной, так и в многослойной земле можно выполнять по допустимому сопротивлению растеканий тока заземлителя или по допустимым напряжениям прикосновения (и шага).

Для электроустановок с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В, а также выше 1000 В до 35 кВ включительно расчет заземлителя производится обычно по допустимому сопротивлению растеканию.

Для электроустановок с эффективно заземленной нейтралью напряжением 110 кВ и выше заземлитель можно рассчитывать как по

допустимому сопротивлению, так и по допустимым напряжениям прикосновения (и шага). В обоих случаях потенциал заземляющего устройства при стекании с него тока замыкания на землю не должен превышать 10 кВ, если возможен вынос потенциала за пределы зданий и внешних ограждений электроустановки. При потенциале заземляющего устройства выше 5 до 10 кВ должны быть предусмотрены меры по защите изоляции отходящих кабелей связи и телемеханики и предотвращению выноса опасных потенциалов за пределы электроустановки.

Порядок расчета:

- а) уточняют исходные данные;
- б) определяют расчетный ток замыкания на землю;
- в) вычисляют требуемое сопротивление заземляющего устройства;
- г) рассчитывают необходимое сопротивление растеканию искусственного заземлителя;
- д) выбирают тип заземлителя и составляют предварительную схему (проект) заземляющего устройства, т. е. размещают на плане установки принятые для сооружения заземлителя электроды и заземляющие проводники;
- е) уточняют параметры заземлителя.

3. Исходные данные для расчета защитного заземления

Для расчета заземления необходимы следующие сведения:

- 1) характеристика электроустановки – тип установки, виды основного оборудования, рабочие напряжения, способы заземления нейтралей трансформаторов и т.п.;
- 2) план электроустановки с указанием основных размеров и размещения оборудования;
- 3) формы и размеры электродов, из которых предусмотрено соорудить проектируемый групповой заземлитель, а также предполагаемая глубина погружения в землю;
- 4) данные измерений удельного сопротивления грунта на участке, где должен быть сооружен заземлитель;

- если земля принимается двухслойной, необходимы данные измерений удельного сопротивления обоих слоев земли и толщина верхнего слоя;

5) данные о естественных заземлителях: какие сооружения могут быть использованы для этой цели и сопротивления их растеканию тока, полученные непосредственным измерением или расчетным путем;

6) расчетный ток замыкания на землю, если ток неизвестен, его вычисляют (расчетный ток замыкания на землю должен быть определен для той из возможных схем сети в эксплуатации, при которой этот ток имеет наибольшее значение;

7) расчетные значения допустимых U_{np} и $U_{ш}$ и время действия защиты, если расчет производится по допустимым напряжением прикосновения и шага.

4. Определение расчетного тока замыкания на землю

Током замыкания на землю называется ток, проходящий через место замыкания на землю, то есть место случайного электрического соединения токоведущей части непосредственно с землей или нетоковедущими проводящими конструкциями или предметами, не изолированными от земли.

В электросетях напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью обмоток источника тока, то есть с малым током замыкания на землю (сети до 35 кВ включительно) расчетный ток зависит от наличия в нейтрали аппаратов, компенсирующих емкостный ток сети.

Для сети с изолированной нейтралью без компенсирующих устройств это будет емкостный ток однофазного замыкания на землю, приближенно он может быть определен по формуле

$$I_3 = \frac{U}{350} (35 \cdot l_{кл} + l_{вл}) \quad (2)$$

где U - линейное напряжение сети, кВ;

$l_{кл}$ и $l_{вл}$ - длины электрически связанных кабельных и воздушных линий, км.

В установках с компенсацией емкостных токов в качестве расчетного тока принимают:

1) для заземляющих устройств, к которым присоединены компенсирующие аппараты, ток, равный 1,25 номинального тока этих аппаратов $I_{ном}$;

2) для установок с малыми токами замыкания на землю, то есть с изолированной нейтралью, допускается принимать ток срабатывания релейной защиты от однофазных замыканий на землю. В этом случае ток замыкания на землю должен быть не менее 1,5 кратного тока срабатывания релейной защиты или трехкратного номинального тока предохранителя.

5. Определение требуемого правилами сопротивления заземляющего устройства

Наибольшие допустимые значения $R_{з.у.}$, установленные ПУЭ, составляют:

а) для установок до 1000 В:

- 10 Ом при суммарной мощности генераторов или трансформаторов, питающих данную сеть, не более 100 кВА;

- 4 Ом - во всех остальных случаях;

б) для установок выше 1000 В:

- 0,5 Ом при эффективно заземленной нейтрали (т.е. при больших токах замыкания на землю);

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

- $125 / I_3 \leq 10$ Ом при изолированной нейтрали и условии, этот заземлитель используется одновременно для установок напряжением до 1000 В.

В этих выражениях I_3 – расчетный ток замыкания на землю, А.

При расчете заземлителя в однородной земле способом коэффициентов использования, имея данные наибольших допустимых их значений, находят допустимое сопротивление заземлителя из выражения:

$$U_{прдон} = \varphi_2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 ; \quad (3)$$

$$U_{np\partial on} = \varphi_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2, \quad (4)$$

а также из выражения

$$\varphi_3 = I_3 \cdot R_3 \leq \frac{U_{np.\partial on.}}{\alpha_1 \alpha_2}, \quad (5)$$

где φ_3 - потенциал заземлителя, В;

α_1 - коэффициент напряжения прикосновения;

α_2 - коэффициент напряжения прикосновения, учитывающий падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек.

Заменив в первых двух уравнениях φ_3 его значением, получаем искомое сопротивление заземлителя, Ом:

$$\text{По напряжению прикосновения: } R_3 = \frac{U_{np.\partial on.}}{I_3 \alpha_1 \alpha_2}; \quad (6)$$

$$\text{По напряжению шага: } R_3 = \frac{U_{ш.\partial on.}}{I_3 \beta_1 \beta_2}. \quad (7)$$

Меньшее значение R_3 и будет расчетным сопротивлением заземлителя.

Коэффициент напряжения прикосновения α_1 находится по таблице приложения или расчетным путем, например, для одиночного стержневого вертикального заземлителя:

$$\alpha_1 = 1 - \frac{\ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}}{\ln \frac{4l}{d}}, \quad (8)$$

где l - длина заземлителя, м;

d - диаметр стержневого электрода, м.

Коэффициент напряжения прикосновения выбирается с учетом падения напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек:

$$\alpha_2 = \frac{R_h}{R_h + R_{осн}}, \quad (9)$$

где $R_{осн}$ – сопротивление растеканию ног человека, его можно определить следующим образом: если площадь подошвы одной ноги принять равной $0,0225 \text{ м}^2$, то диаметр эквивалентного ей диска будет $0,17 \text{ м}$, а сопротивление растеканию тока составит:

$$R_p = \frac{\rho}{2d} \approx \rho. \quad (10)$$

Полагая, что ступни ног отстоят одна от другой на расстоянии шага, получим искомое сопротивление растеканию основания:

$$R_{осн} = \frac{R_2}{2} \approx 1,5\rho; \quad (11)$$

по напряжению шага:

$$R_3 = \frac{U_{шдоп}}{I_3\beta_1\beta_2}, \quad (12)$$

где β_1 - коэффициент шага.

Для одиночного стержневого вертикального заземлителя:

$$B_{\max} = \frac{\ell na - \ell nr}{\ell n 2\ell - \ell nr}, \quad (13)$$

где a - шаг человека, м;

r - радиус стержневого электрода, м;

l - длина электрода, м;

β_2 - коэффициент напряжения шага, учитывающий падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек:

$$\beta_2 = \frac{R_h}{R_h + 2R_n}; \quad (14)$$

$$\beta_2 = \frac{R_h}{R_h + 6\rho}. \quad (15)$$

При выборе коэффициентов α_2 и β_2 определяют, считая, что ρ - расчетное удельное сопротивление основания, на котором стоит человек (пола, гравийной засыпки или грунта), Ом·м; R_h - сопротивление тела человека, принимаемое равным 1000 Ом .

При расчетах сложного заземлителя в двухслойной земле (способ наведенных потенциалов) коэффициент α_1 находят из выражения:

$$\alpha_1 = \frac{M}{\left(\frac{\ell_B L_\Gamma}{a \sqrt{S}} \right)^{0,45}}, \quad (16)$$

или по упрощенной формуле

$$\alpha_1 = \left(1,68 - \frac{0,68}{\rho_1/\rho_2} \right) \sqrt{\frac{S}{L_\Gamma L_B}}, \quad (17)$$

где M – параметр, зависящий от отношения удельных сопротивлений верхнего (ρ_1) и нижнего (ρ_2) слоев земли;

Таблица 1 – Зависимость параметра M от отношения удельных сопротивлений верхнего (ρ_1) и нижнего (ρ_2) слоев земли

$\frac{\rho_1}{\rho_2}$	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	10,0
M	0,36	0,5	0,62	0,69	0,72	0,75	0,77	0,79	0,8	0,82

L_B – длина вертикального электрода;

L_Γ – суммарная длина горизонтальных электродов, м;

S – площадь, занимаемая заземлителем, м².

Коэффициент α_2 вычисляют по формуле

$$\alpha_2 = \frac{R_h}{R_h + 1,5\rho_1}. \quad (18)$$

где ρ_1 – расчетное удельное сопротивление внешнего слоя земли Ом·м.

6. Определение требуемого сопротивления искусственного заземлителя

При использовании естественных заземлителей (предписывается ПУЭ) сопротивление искусственного заземлителя R_u , Ом, меньше требуемого R_z , Ом и равно:

$$R_u = \frac{R_e R_z}{R_e - R_z}, \quad (19)$$

где R_e - сопротивление растеканию естественного заземлителя, Ом.

R_u - сопротивление растеканию искусственного заземлителя, Ом.

Сопротивления естественных заземлителей определяют непосредственно измерениями.

7. Уточнение параметров заземлителя

После составления предварительной схемы заземлителя и имеющихся данных о расчетных удельных сопротивлениях грунта вычисляют расчетное сопротивление этого заземлителя R и результат сравнивают с ранее определенным расчетным значением требуемого сопротивления искусственного заземлителя R_u .

Если значения R и R_u совпадают или отличаются незначительно, значит все основные параметры принятого нами заземлителя – форма, размеры, размещение электродов в земле и один относительно другого – выбраны правильно и, следовательно, напряжения прикосновения и шага находятся в допустимых пределах.

При значительных расхождениях в значениях R и R_u необходимо внести поправки в предварительную схему заземлителя – изменить количество и размещение электродов, а иногда их размеры, площадь, занимаемую заземлителем, и прочее и вновь вычислить R .

Таким образом, вычисление R является поверочным и производится методом последовательного приближения.

После вычисления окончательного значения сопротивления искусственного заземлителя определяют сопротивление заземлителя в целом, то есть с учетом R_e :

$$R_z = \frac{R \cdot R_e}{R + R_e}. \quad (20)$$

Для электроустановок с эффективно заземленной нейтралью вычисляют потенциал заземляющего устройства в аварийный период ϕ_{3y} , В, на основании выражения

$$\varphi_{3y} = I_3 R_{3y} = I_3 R_3, \quad (21)$$

где I_3 – ток замыкания на землю, а $R_{3y} \approx R_3$. Потенциал заземляющего устройства в аварийный период не должен превышать 10 кВ.

При расчете заземлителя в однородной земле способом коэффициента использования значение R определяют в следующем порядке.

1) По предварительной схеме заземлителя, нанесенной на план установки, определяют длину и количество горизонтальных и вертикальных электродов, n .

2) По формулам (таблица П.1 приложения) вычисляют расчетные сопротивления горизонтальных электродов (суммарное сопротивление) R_Γ и одного вертикального R_B .

3. По данным таблиц П.2 и П.3 приложения находят коэффициенты использования для вертикальных и горизонтальных электродов η_B и η_Γ .

4. Вычисляют расчетное сопротивление заземлителя R по уравнению:

$$R = \frac{R_B R_\Gamma}{R_B \eta_\Gamma + R_\Gamma \eta_B \cdot n}. \quad (22)$$

Сопротивление заземлителей в виде горизонтальной сетки вычисляют по выражению (в соответствии с рис. 10):

$$R = A \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L_\Sigma + n l_\epsilon}, \quad (23)$$

где A - коэффициент, значение которого равно:

$$A = 0,444 - 0,84 t_{\text{отн}} \quad \text{при } 0 \leq t_{\text{отн}} \leq 0,1;$$

$$A = 0,385 - 0,25 t_{\text{отн}} \quad \text{при } 0,1 \leq t_{\text{отн}} \leq 0,5;$$

$t_{\text{отн}}$ - относительная глубина погружения в землю вертикальных электродов:

$$t_{\text{отн}} = \frac{l_\epsilon + t_\epsilon}{\sqrt{S}}, \quad (24)$$

где t_ϵ - глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода, м;

S - площадь, занимаемая заземлителем, м²;

l_ϵ - длина вертикального электрода, м.

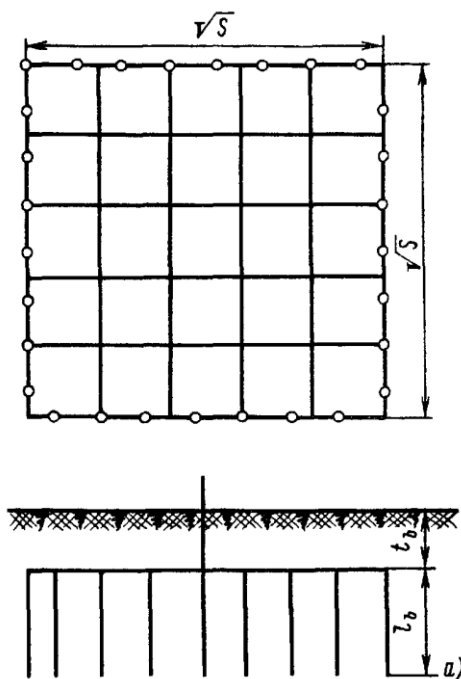


Рис. 10. Сложный заземлитель в однородной земле в виде квадратной горизонтальной сетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерным размещением вертикальных электродов (по периметру заземлителя)

К такому виду может быть приведен любой сложный заземлитель в виде горизонтальной сетки с различным расположением горизонтальных и примерно равномерным размещением вертикальных электродов (например, на рис. 10). При этом, однако, должны быть определены площадь S , суммарная длина горизонтальных электродов L_G , количество и длина вертикальных электродов l_B , а также глубина заложения их в земле.

Если заземлитель представляет собой горизонтальную сетку без вертикальных электродов, то его сопротивление определяют с помощью формулы Олендорфа – Лорана:

$$R = 0,444 \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L_G}. \quad (25)$$

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

1. По предварительной схеме определяют площадь территории, занимаемой заземлителем, $S \text{ м}^2$; суммарную длину горизонтальных электродов L_G , (м);

Количество n вертикальных электродов и их суммарную длину, (м), определяют по формуле

$$L_B = n \cdot l_B. \quad (26)$$

2. Составляют условную, расчетную модель заземлителя (рис. 10), представляющую собой горизонтальную квадратную сетку из взаимно пересекающихся полос с вертикальными электродами по периметру. Расчетная модель погружена в однородную землю с расчетным эквивалентным удельным сопротивлением ρ_{Σ} Ом·м, при котором искомое R имеет то же значение, что и в принятой схеме заземлителя в двухслойной земле.

3. Вычисляют:

- а) длину одной стороны модели, равной $\sqrt{S}$;
- б) количество ячеек m по одной стороне модели:

$$m = \frac{L_z}{2\sqrt{S}} - 1. \quad (27)$$

Если m окажется дробным числом, его округляют до целых чисел, после чего уточняют значение L_z , м:

$$L_z = 2(m+1)\sqrt{S}; \quad (28)$$

- в) длину стороны ячейки в модели, м:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}; \quad (29)$$

г) количество вертикальных электродов n , задавшись расстоянием «а», метров, между ними, или, если известно расстояние – a , предварительно намечают размещение этих электродов в схеме модели. Обычно их размещают по периметру заземлителя, и в этом случае n или a вычисляют по формуле

$$n \cdot a = 4 \sqrt{S}; \quad (30)$$

д) суммарную длину l_{Σ} , м, вертикальных электродов n по формуле (19);

е) относительную глубину погружения в землю вертикальных электродов $t_{отн}$ по формуле (24);

ж) относительную длину $l_{отн}$, м, верхней части вертикальных электродов заземлителя, то есть части, находящейся в верхнем слое земли:

$$l_{отн} = \frac{h_1 - t_6}{l_6}, \quad (31)$$

где h_1 - толщина верхнего слоя земли;

з) расчетное эквивалентное удельное сопротивление земли $\rho_э$, Ом·м, для сложного заземлителя (горизонтальная сетка с вертикальными электродами) по формуле

$$\rho_э = \rho_2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^K, \quad (32)$$

где ρ_1 и ρ_2 - удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев земли соответственно, Ом·м;

K - показатель степени:

при $0,1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} \leq 1$,

$$K = 0,32 \left(1 + 0,26 \ln \frac{h_1}{l_d} \right); \quad (33)$$

при $1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} \leq 10$,

$$K = 0,43 \left(l_{отн} + 0,272 \ln \frac{a\sqrt{2}}{l_d} \right). \quad (34)$$

4. Вычисляют искомое расчетное сопротивление R , Ом, по формуле (23) или, если заземлитель не имеет вертикальных электродов, - по формуле (25).

Пример расчёта 1

РАСЧЁТ ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ В ОДНОРОДНОЙ ЗЕМЛЕ МЕТОДОМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПО ДОПУСТИМОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ

Задание:

- 1) Рассчитать заземлитель подстанции 6/0,4 кВ.

Исходные данные к расчёту :

Подстанция понижающая, имеет два трансформатора 6/0,4 кВ с заземленными нейтралями на стороне 0,4 кВ; размещена в отдельно стоящем одноэтажном кирпичном здании размеры которого в плане указаны на рис. 11.



Рис. 11. Предварительная схема заземления подстанции

- 1) Размеры ПС – 18000 x 12000 мм (L_x x L_y)
- 2) Сопротивление естественного заземлителя $R_e = 15$ Ом.

В качестве естественного заземлителя будет использована металлическая технологическая конструкция, частично погруженная в землю;

- 3) Ток замыкания на землю не известен, однако известна протяженность линий:

- кабельных $l_{кл} = 65$ км;

- воздушных $l_{ВЛ} = 50$ км;

4) Параметры вертикального электрода:

- длина $l_B = 3$ м;

- диаметр $d = 10$ мм;

5) Параметры горизонтального электрода:

- длина l_Γ – вычисляется по размерам ($L_x \times L_y$) подстанции;

Верхние концы вертикальных электродов соединяются с помощью горизонтального электрода – стальной полосы суммарной длиной l_Γ , сечением $(a \times b) = (4 \times 40)$ мм, уложенной в землю на глубине $t_0 = 0,5$ м.

6) Сопротивление слоёв земли:

Расчетные удельные сопротивления земли получены в результате измерений на участке, где предполагается сооружение заземлителя, и расчеты равны:

- для вертикального электрода $\rho_{расч.В} = 120$ Ом·м;

- для горизонтального длиной 50 м $\rho_{расч.Г} = 176$ Ом·м;

7) Расстояние между вертикальными электродами: $a = 6$ м.

Решение:

1) Расчетный ток замыкания на землю на стороне 6 кВ определяем по формуле

$$I_3 = \frac{U}{350} (35l_{ВЛ} + l_{кл}) = \frac{6}{350} (35 \cdot 65 + 50) = 0,017 \cdot 2325 = 39,525 \text{ А}.$$

2) Требуемое сопротивление растеканию заземлителя, который принимаем общим для установок 6 и 0,4 кВ согласно требования ПУЭ:

$$R_3 = \frac{125}{I_3} = \frac{125}{39,525} = 3,163 \text{ Ом}.$$

3) Требуемое сопротивление искусственного заземлителя :

$$R_H = \frac{R_\Gamma R_3}{R_\Gamma - R_3} = \frac{15 \cdot 3,163}{15 - 3,163} = 4,0 \text{ Ом}.$$

4) Длина горизонтального электрода:

$$l_\Gamma = (L_x \times L_y) \cdot 2 = (18 + 12) \cdot 2 = 60 \text{ м}.$$

Так как расстояние между вертикальными электродами $a = 6$ м, то количество вертикальных электродов:

$$n = l_{\Gamma} / a = 60 / 6 = 10 \text{ шт.}$$

5) Определяем расчетные сопротивления растеканию R_B вертикальных электродов, по формулам, приведенным в таблицах П.1 приложения:

$$R_B = \frac{\rho_{\text{расч.В}}}{2 \cdot \pi \cdot l_B} \left(\ln \left(\frac{2 \cdot l_B}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4t + l_B}{4t - l_B} \right) \right) =$$

$$= \frac{120}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left(\ln \left(\frac{2 \cdot 3}{0,01} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 2 + 3}{4 \cdot 2 - 3} \right) \right) = 43,26 \text{ Ом},$$

$$\text{где } t = t_0 + 0,5 \cdot l_B = 0,5 + 0,5 \cdot 3 = 2 \text{ м.}$$

6) Определяем расчетные сопротивления растеканию R_{Γ} горизонтальных электродов, по формулам, приведенным в таблицах П.2, П.3 приложения.

Принимаем для горизонтальных электродов $t = t_0 = 0,5$ м:

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho_{\text{расч.Г}}}{2 \cdot \pi \cdot L_{\Gamma}} \cdot \ln \frac{l_{\Gamma}^2}{0,5 \cdot b \cdot t} = \frac{176}{2 \cdot \pi \cdot 60} \cdot \ln \left(\frac{60^2}{0,5 \cdot 0,04 \cdot 0,5} \right) = 5,975 \text{ Ом}.$$

7) Определение предварительного значения коэффициентов использования электродов заземлителей – вертикальных η_B , горизонтального η_{Γ} по таблицам П.2 и П.3 Приложения:

для $a/l_B = 6/3 = 2$ и $n = 10$ из таблиц получаем $\eta_B = 0,68$, $\eta_{\Gamma} = 0,4$.

8) Сопротивление растеканию группового заземлителя:

$$R_{\text{ГП}} = \frac{R_B R_{\Gamma}}{R_B \eta_{\Gamma} + R_{\Gamma} n \eta_B} = \frac{43,26 \cdot 5,975}{43,26 \cdot 0,4 + 5,975 \cdot 10 \cdot 0,68} = 4,462 \text{ Ом}.$$

Это сопротивление оказывается больше, чем требуемое $R_{\text{И}}$ (4,0 Ом), поэтому принимаем решение увеличить в контуре заземлителя количество вертикальных электродов до 13 шт.

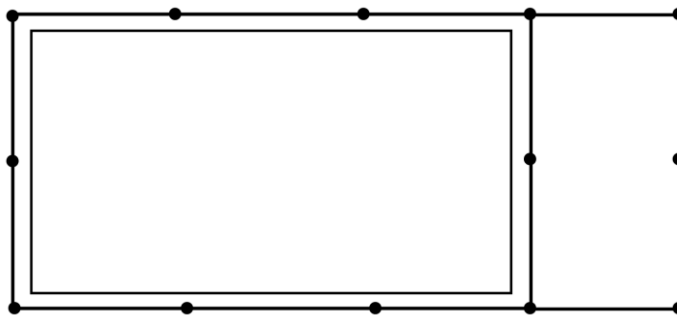


Рис. 12. Окончательная схема заземлителя

9) Определяем новое значение коэффициента η_B :

для $a/l_B = 6/3 = 2$ и $n = 13$ из таблиц получаем промежуточные значения η_B , требующие применения формулы интерполяции;

для $n_{\min} = 10$ из таблицы $\eta_{B,\max} = 0,68$;

для $n_{\max} = 20$ из таблицы $\eta_{B,\min} = 0,63$;

$$\eta_B = \eta_{B,\min} + \left(\frac{\eta_{B,\max} - \eta_{B,\min}}{n_{\max} - n_{\min}} \right) \cdot (n_{\max} - n) = 0,63 + \left(\frac{0,68 - 0,63}{20 - 10} \right) \cdot (20 - 13) = 0,665 .$$

10) Определяем новое значение коэффициента η_Γ :

для $a/l_B = 6/3 = 2$ и $n = 13$ из таблиц получаем промежуточные значения η_Γ , требующие применения формулы интерполяции;

для $n_{\min} = 10$ из таблицы $\eta_{\Gamma,\max} = 0,4$;

для $n_{\max} = 20$ из таблицы $\eta_{\Gamma,\min} = 0,32$;

$$\eta_\Gamma = \eta_{\Gamma,\min} + \left(\frac{\eta_{\Gamma,\max} - \eta_{\Gamma,\min}}{n_{\max} - n_{\min}} \right) \cdot (n_{\max} - n) = 0,32 + \left(\frac{0,4 - 0,32}{20 - 10} \right) \cdot (20 - 13) = 0,376 .$$

11) Новое сопротивление растеканию группового заземлителя:

$$R_{\Gamma P} = \frac{R_B R_\Gamma}{R_B \eta_\Gamma + R_\Gamma n \eta_B} = \frac{43,26 \cdot 5,975}{43,26 \cdot 0,376 + 5,975 \cdot 13 \cdot 0,665} = 3,806 \text{ Ом} .$$

Это сопротивление меньше требуемого ($R_{\Gamma P} < R_{II}$), но так как разница между ними невелика (0,194 Ом) и она удовлетворяет условиям безопасности, принимаем этот результат как окончательный.

12) Итоговые расчётные данные заземлителя подстанции 6/0,4 кВ:

- количество вертикальных электродов $n = 13$ шт.;
- длина вертикальных электродов $l_B = 3$ м;
- расстояние между вертикальными электродами $a = 6$ м;
- новая длина горизонтальных электродов $l_{\Gamma} = 60 + 24 = 84$ м;
- глубина заложения горизонтальных электродов $t_0 = 0,5$ м.

Пример расчёта 2

РАСЧЁТ СЛОЖНОГО ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ В ДВУХСЛОЙНОЙ ЗЕМЛЕ

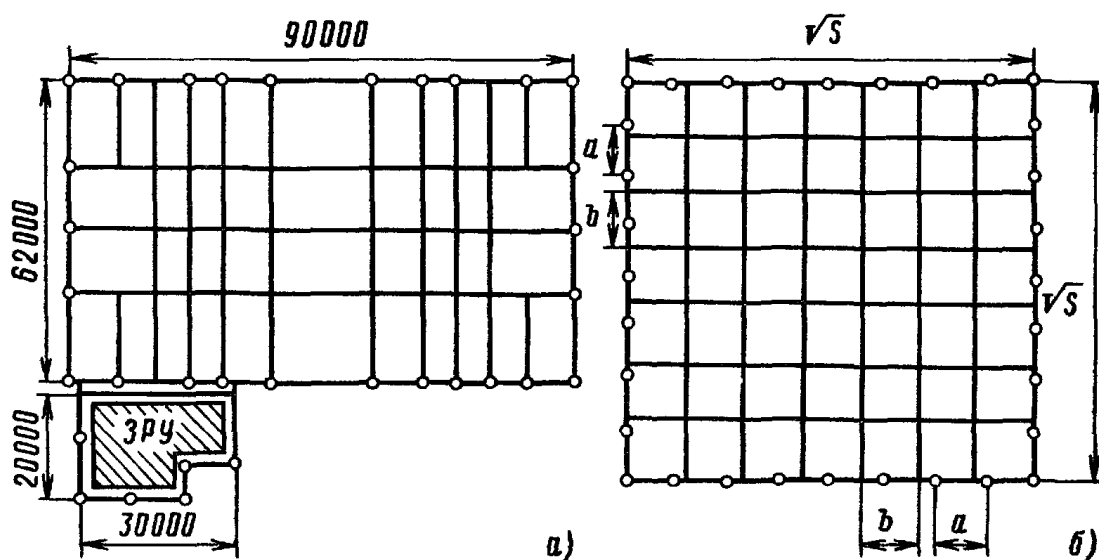


Рис. 13. Расчёт сложного заземлителя в двухслойной земле:
а) предварительная схема заземлителя: б) расчётная модель

Задание на расчёт

Необходимо рассчитать заземлитель подстанции 110/35/6 кВ (рис. 13).

Исходные данные

Подстанция понижающая, имеет два трансформатора 110/35/6 кВ с эффективно заземленной нейтралью со стороны 110 кВ. Для питания собственных нужд имеется трансформатор 6/0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью низшего напряжения; распределительные устройства 110 и 35 кВ открытого типа, 6 кВ закрытого типа.

В качестве естественного заземлителя использовать систему трос-опоры двух отходящих от подстанции воздушных линий электропередачи 110 кВ на металлических опорах с длиной пролета $l_{ВЛ} = 250$ м, каждая линия имеет стальной грозозащитный трос сечением $S = 50$ мм²; расчетное (с учетом сезонных колебаний) сопротивление заземления одной опоры

$r_{on} = 12$ Ом; число опор с тросом от каждой линии больше 20; данные измерений сопротивления системы тросопоры отсутствуют.

Дополнительные исходные данные

- 1) Площадь ПС 110/35 /6 кВ:
 $S_{\text{ПС(ОРУ)}} = L_x \times L_y = 90 \cdot 72 = 6480 \text{ м}^2$;
 $S_{\text{ПС(ЗРУ)}} = L_x \times L_y = 30 \cdot 20 = 600 \text{ м}^2$;
 Суммарная площадь ПС: $S_{\text{ПС}} = S_{\text{ПС(ОРУ)}} + S_{\text{ПС(ЗРУ)}} = 7080 \text{ м}^2$.
- 2) Параметры вертикальных электродов:
 $l_B = 3 \text{ м}$;
 $d = 12 \text{ мм}$.
- 3) Параметры горизонтальных электродов:
 - суммарная длина горизонтальных электродов L_{Γ} (определяется в расчёте).
- 4) Сопротивление слоёв земли:
 - сопротивление верхнего слоя: $\rho_1 = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
 - сопротивление нижнего слоя: $\rho_2 = 85 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.
- 5) Толщина (мощность) верхнего слоя земли $h_1 = 2,8 \text{ м}$.
- 6) Расчетный ток замыкания на землю
 - на стороне 110 кВ составляет 5 кА;
 - на стороне 35 кВ – 45 А;
 - на стороне 6 кВ – 30 А.
- 7) Параметры воздушных линий:
 - количество ВЛ $n_{\text{Л}} = 2$;
 - длина $l_{\text{ВЛ}} = 250 \text{ м}$ с тросом сечением $S = 50 \text{ мм}^2$.
- 8) Сопротивление опоры воздушной линии: $r_{on} = 12 \text{ Ом}$.
- 9) Число тросов на опоре ВЛ: $n_m = 1$.
- 10) Число вертикальных электродов: $n = 32$.
- 11) Глубина заложения вертикальных электродов: $t_B = 0,8 \text{ м}$.
- 12) Сечение горизонтального электрода: 4x40 мм.

Решение

1) Сопротивление стального троса:

$$r_T = \frac{0,15 \cdot l_{БЛ}}{S} = \frac{0,15 \cdot 250}{50} = 0,75 \text{ Ом}.$$

2) Сопротивление заземлителя растеканию тока R_3 , согласно требованиям ПУЭ, должно быть не более 0,5 Ом. Сопротивление естественного заземлителя для двух линий R_E определяется по формуле

$$R_E = \frac{1}{n_L} \sqrt{\frac{r_{on} r_T}{n_T}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot 0,75}{1}} = 1,5 \text{ Ом},$$

где r_{on} – расчетное, то есть наибольшее (с учетом сезонных колебаний) сопротивление заземления одной опоры, Ом;

r_T – активное сопротивление троса на длине одного пролета, Ом;

n_T – число тросов на опоре.

3) Принимаем сопротивление заземлителя растеканию тока $R_3 = 0,5$ Ом, тогда сопротивление искусственного заземлителя:

$$R_{II} = \frac{R_E \cdot R_3}{R_E - R_3} = \frac{1,50 \cdot 0,5}{1,50 - 0,5} = 0,75 \text{ Ом}.$$

4) Определение длины горизонтальных электродов:

для ОРУ: $L_{ору} = L_x \cdot n_x + L_y \cdot n_y + 0,5 \cdot L_y \cdot 2 = 90 \cdot 5 + 72 \cdot 10 + 0,5 \cdot 72 \cdot 2 = 1242 \text{ м};$

для ЗРУ: $L_{зру} = (L_x + L_y) \cdot 2 = (20 + 30) \cdot 2 = 100 \text{ м}.$

Суммарная длина горизонтальных электродов:

$$L_\Sigma = L_{ору} + L_{зру} = 1242 + 100 = 1342 \text{ м}.$$

5) Количество вертикальных электродов подсчитываем по схеме рисунка 14(а):

$$n_B = 32.$$

6) Расчётная схема заземлителя в виде в виде квадратной сетки:

$$S_{ПС} = 7080 \text{ м}^2;$$

$$\sqrt{S} = \sqrt{7080} = 84,143 \text{ м};$$

$$L_{\Gamma} = 1342 \text{ м.}$$

7) Количество ячеек m в квадратной сетке модели:

$$m = \frac{L_{\Gamma}}{2\sqrt{S}} - 1 = \frac{1342}{2 \cdot 84,143} - 1 = 6,975.$$

Принимаем целое число $m = 7$.

8) Уточняем суммарную длину горизонтальных электродов:

$$L_{\Gamma} = 2 \cdot (m + 1) \cdot \sqrt{S} = 2 \cdot (7 + 1) \cdot 84,143 = 1346,288 \text{ м.}$$

9) Длина стороны ячейки в модели:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m} = \frac{84,143}{7} = 12,02 \approx 12 \text{ м.}$$

10) Расстояние между вертикальными электродами a_B :

$$a_B = \frac{4\sqrt{S}}{n} = \frac{4 \cdot 84,143}{32} = 10,52 \text{ м.}$$

11) Суммарная длина вертикальных электродов по формуле

$$L_B = n \cdot l_B = 32 \cdot 3 = 96 \text{ м.}$$

12) Относительная глубина погружения в землю вертикальных электродов:

$$t_{\text{отн}} = \frac{l_B + t_B}{\sqrt{S}} = \frac{3 + 0,8}{84,143} = 0,045.$$

13) Относительная длина:

$$l_{\text{отн}} = \frac{h_1 - t_{\text{г}}}{l_{\text{г}}} = \frac{2,8 - 0,8}{3} = 0,67.$$

14) Находим значения $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{200}{85} = 2,35$.

15) Производим расчёт и выбор показателя степени K для расчёта удельного эквивалентного сопротивления земли.

Поскольку $1 < \frac{\rho_1}{\rho_2} < 10$, значение K находим по формуле

$$K = 0,43 \cdot \left(l_{\text{отн}} + 0,272 \cdot \ln \frac{a_B \cdot \sqrt{2}}{l_B} \right) =$$

$$= 0,43 \cdot \left(0,67 + 0,272 \cdot \ln \frac{10,52 \cdot 1,4}{3} \right) = 0,474.$$

16) Расчетное эквивалентное удельное сопротивление земли $\rho_{\text{э}}$ определяем по формуле:

$$\rho_{\text{э}} = \rho_2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^K = 85 \cdot \left(\frac{200}{85} \right)^{0,474} = 127,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

17) Определение коэффициента A в зависимости от $t_{\text{отн}}$:

Так как $0 < t_{\text{отн}} < 0,1$.

То коэффициент A определяется по формуле

$$A = 0,444 - 0,84 t_{\text{отн}} = 0,444 - 0,84 \cdot 0,045 = 0,4062.$$

18) Определяем сопротивление заземлителя:

$$R = A \frac{\rho_{\text{э}}}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_{\text{э}}}{L_{\Gamma} + L_B} = 0,4062 \cdot \frac{127,5}{84,143} + \frac{120}{1346 + 96} = 0,7 \text{ Ом}.$$

Это значение R практически совпадает с требуемым сопротивлением искусственного заземлителя (0,75 Ом); некоторая разница допустима, тем более, что в данном случае она повышает условия электробезопасности.

19) Общее сопротивление заземлителя подстанции (с учетом сопротивления естественного заземлителя):

$$R_3 = \frac{R \cdot R_B}{R + R_B} = \frac{0,7 \cdot 1,5}{0,7 + 1,5} = 0,477 \text{ Ом}.$$

20) Определяем потенциал заземляющего устройства в аварийный период:

$$\varphi_{\text{зв}} = I_3 R_3 = 5000 \cdot 0,477 = 2385 \text{ В.}$$

Этот потенциал допустим, так как он менее $\varphi_{\text{зв}} < 10 \text{ кВ}$.

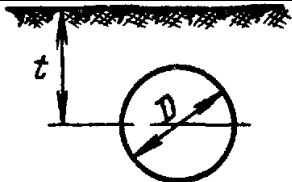
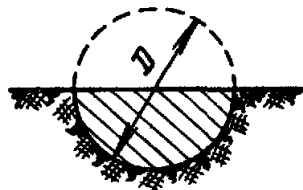
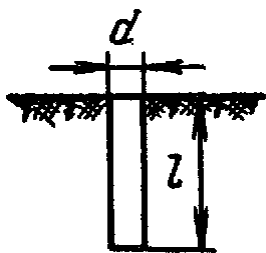
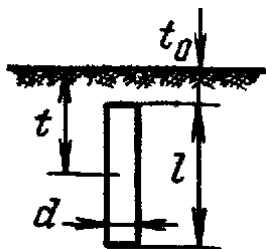
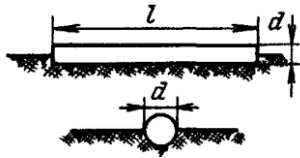
21) Вывод:

Заземление подстанции в результате расчётов выполняется из:

- горизонтальных электродов сечением 4х40 мм и общей длиной $L_{\Gamma} = 1346 \text{ м}$;
- вертикальных электродов в количестве $n_B = 32$ шт, диаметром $d_B = 12 \text{ мм}$, длиной каждый $l_B = 3 \text{ м}$, размещённых на расстоянии $a_B = 10,52 \text{ м}$ друг от друга, с глубиной погружения $t_B = 0,8 \text{ м}$;
- сопротивление искусственного заземлителя $R_{\text{И}} = 0,75 \text{ Ом}$;
- сопротивление заземлителя подстанции $R_3 = 0,477 \text{ Ом}$.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1 – Формулы для вычисления сопротивлений одиночных заземлителей растеканию тока в однородном грунте

№	Тип заземлителя	Схема	Формула	Условия применения
1	Шаровой в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi D} \cdot \left(1 + \frac{D}{4t}\right)$	$2t \gg d$
2	Полушаровой у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{\pi D}$	----
3	Стержневой круглого сечения (трубчатый) или уголкового у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{4l}{d}$	$l \gg d$ Для уголка с шириной полки b $d=0,95b$
4	Стержневой круглого сечения (трубчатый) или уголкового в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot l_B} \left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4t+l}{4t-l} \right) \right)$	$l \gg d$ $t_0 > 0,5$ м Для уголка с шириной полки b $d=0,95b$
5	Протяжённый на поверхности земли (стержень, труба, полоса, кабель)		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{4l^2}{d^2}$	$l \gg d$ Для полосы шириной b $d=0,5b$

Продолжение таблицы П.1

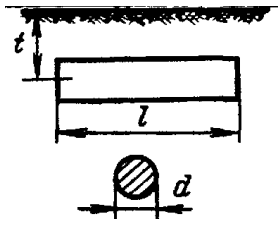
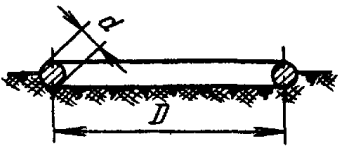
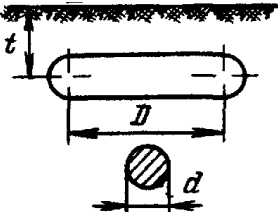
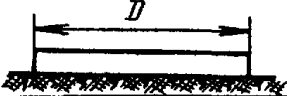
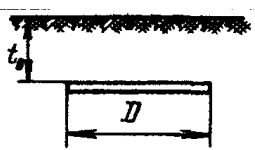
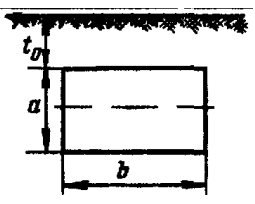
№	Тип заземлителя	Схема	Формула	Условия применения
6	Протяжённый в земле (стержень, труба, полоса, кабель)		$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l^2}{d \cdot t}$	$l \gg d$ $l \gg 4t$ Для полосы шириной b $d=0,5b$
7	Кольцевой на поверхности земли		$R = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{8D}{d}$	$D \gg d$ Для полосы шириной b $d=0,5b$
8	Кольцевой в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \cdot \ln \frac{4\pi D^2}{d \cdot t}$	$D \gg d$ $D \gg 2t$ Для полосы шириной b $d=0,5b$
9	Круглая пластина на поверхности земли		$R = \frac{\rho}{2D}$	D – диаметр пластины
10	Круглая пластина в земле		$R = \frac{\rho}{4D} \left(1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{D}{\sqrt{16t_0^2 + D^2}} \right)$	$2t_0 \gg D$
11	Пластиначатый в земле (пластина поставлена на ребро)		$R = \frac{\rho}{2\pi a} \left(\ln \frac{4a}{b} + \frac{a}{4 \cdot t_0} \right)$	$2t_0 \gg a$

Таблица П.2 – Коэффициенты использования η_B вертикальных электродов группового заземлителя (труб, уголков и т.д.) без учёта влияния полосы связи

Отношение расстояния между вертикальными электродами к их длине	Число заземлителей n							
	2	4	6	10	20	40	60	100
	Электроды размещены в ряд (рис. 15, а)							
1	0,85	0,73	0,65	0,59	0,48	---	---	---
2	0,91	0,83	0,77	0,74	0,67	---	---	---
3	0,94	0,89	0,85	0,81	0,76	---	---	---
	Электроды размещены по контуру (рис. 15, б)							
1	---	0,69	0,61	0,56	0,47	0,41	0,39	0,36
2	---	0,78	0,73	0,68	0,63	0,58	0,55	0,52
3	---	0,85	0,80	0,76	0,71	0,66	0,64	0,62

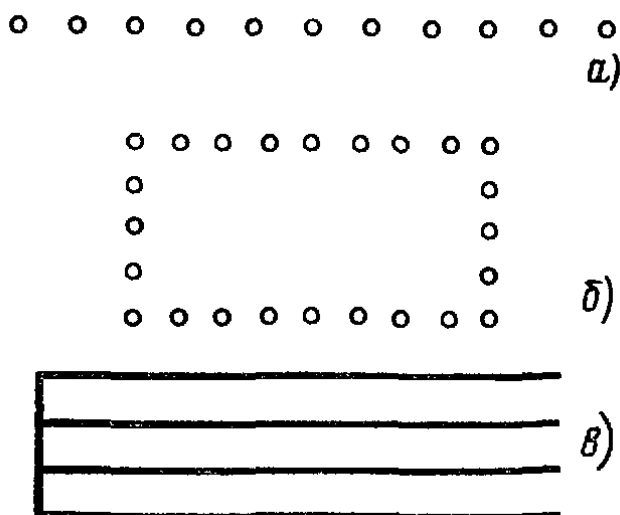


Рис. 15. Способы размещения электродов группового заземлителя (вид в плане) а – вертикальные электроды размещены в ряд; б – вертикальные электроды размещены по контуру; в – горизонтальные электроды уложены параллельно на одинаковой глубине

Таблица П.3 – Коэффициенты использования η_{Γ} горизонтального полосового электрода, соединяющего вертикальные электроды (трубы, уголки и т.п.) группового заземлителя

Отношение расстояния между вертикальными электродами к их длине	Число вертикальных электродов							
	2	4	6	10	20	40	60	100
Вертикальные электроды размещены в ряд (рис. 15, а)								
1	0,85	0,77	0,72	0,62	0,42	---	---	---
2	0,94	0,80	0,84	0,75	0,56	---	---	---
3	0,96	0,92	0,88	0,82	0,68	---	---	---
Вертикальные электроды размещены по контуру (рис. 15, б)								
1	---	0,45	0,40	0,34	0,27	0,22	0,20	0,19
2	---	0,55	0,48	0,40	0,32	0,29	0,27	0,23
3	---	0,70	0,64	0,56	0,45	0,39	0,36	0,33

Таблица П.4 – Коэффициенты использования η_{Γ} параллельно уложенных горизонтальных полосовых электродов группового заземлителя (ширина полосы $b=20 - 40$ мм; глубина заложения $0,3 - 0,8$ м; рис. 15, в)

Длина полосы, м	Число параллельных полос	Расстояние между параллельными полосами, м				
		1	2,5	5	10	15
15	2	0,63	0,75	0,83	0,92	0,96
	5	0,37	0,49	0,60	0,73	0,79
	10	0,25	0,37	0,49	0,64	0,72
	20	0,16	0,27	0,39	0,57	0,64
25	5	0,35	0,45	0,55	0,66	0,73
	10	0,23	0,31	0,43	0,57	0,66
	20	0,14	0,23	0,33	0,47	0,57
50	2	0,60	0,69	0,78	0,88	0,93
	5	0,33	0,40	0,48	0,58	0,65
	10	0,20	0,27	0,35	0,46	0,53
	20	0,12	0,19	0,25	0,36	0,44

Таблица П.5 – Значения коэффициента m , входящего в формулы (27),(28),(29)

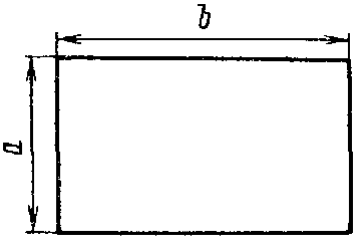
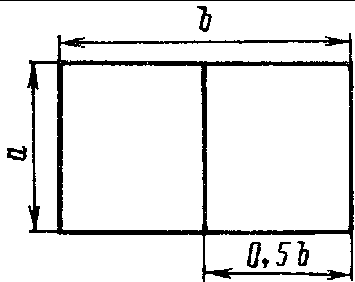
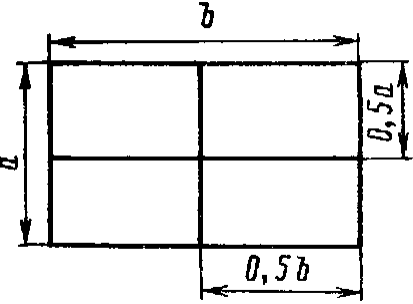
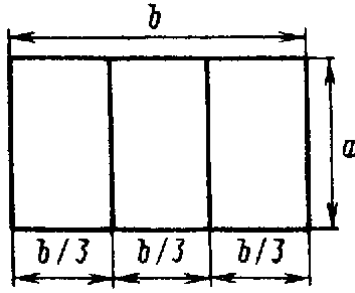
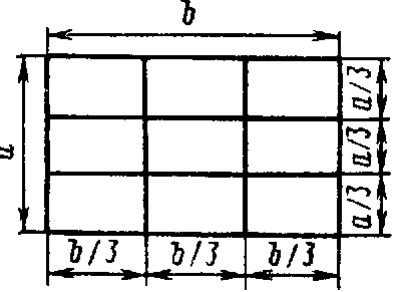
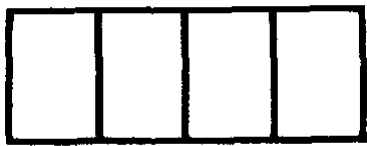
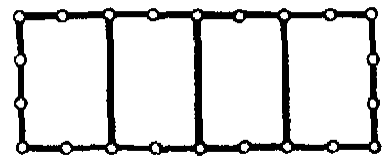
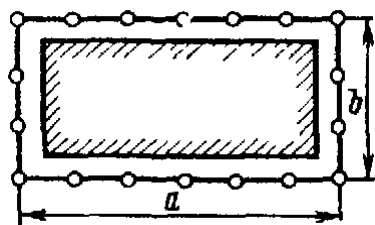
Конструкция решётки	Отношения сторон решётки				
	10	15	20	30	40
	1,71	1,76	1,86	2,10	2,34
	3,67	3,41	3,31	3,29	3,35
	4,95	5,16	5,44	6,00	6,52
	4,33	4,43	4,73	5,04	5,61
	8,55	8,94	9,40	10,3	11,11

Таблица П.6 – Наибольшие значения коэффициентов прикосновения α_1 и шага β_1

Тип заземлителя	Число внутренних полос	Расстояние между параллельными полосами, м	α_1	β_1		
Одиночный горизонтальный, заглубление $t_0 \approx 0,5$ м	---	---	1	0,3		
Групповой – вертикальные стержневые электроды расположены в ряд и соединены полосой; заглубление $t_0 \approx 0,8$ м	---	---	1	0,6		
Групповой контурный из полос с внутренними параллельными полосами; $t_0 \approx 0,5$ м 	2	2,5	0,3	0,15		
		5	0,35			
		10	0,4			
		15	0,45			
	5	2,5	0,15			
		5	0,2			
		10	0,3			
		15	0,35			
	10	2,5	0,1			
		5	0,15			
		10	0,25			
		15	0,3			
	Групповой контурный из стержней и полос с внутренними параллельными полосами; $t_0 \approx 0,5$ м 	5	2,5		0,1	0,15
			5		0,15	
			10		0,25	
			15		0,35	
10		2,5	0,08			
		5	0,1			
		10	0,2			
		15	0,25			
Групповой контурный из стержней и полос (вокруг здания, сооружения); $t_0 \approx 0,5$ м 	---	$a = b$	0,4	0,3		
		$a = 2b$	0,35	0,25		
		$a = 3b$	0,3	0,2		

Примечание 1: Для заземлителей первых двух типов значение α_1 даны для случая, когда человек находится на расстоянии 20 м и более от заземлителя. Все остальные значения α_1 относятся к случаям нахождения человека внутри контура.

Примечание 2: Для заземлителя последнего типа отношение расстояния между соседними вертикальными электродами s и длиной вертикального электрода l_B , то есть s/l_B находится в пределах 1-3.

[illegible]

Таблица П.8 – Значение коэффициента B_0 , входящего в формулу для вычисления сопротивления растеканию одиночного горизонтального заземлителя (электрода) в двухслойной земле

ρ_1 / ρ_2	$h_1, \text{ м}$	$t_0, \text{ м}$	B_0 при длине электрода $l, \text{ м}$					
			5	10	20	30	40	50
0,5	1	0,5	0,14	0,090	0,054	0,041	0,032	0,027
	1	0,8	0,14	0,089	0,054	0,040	0,032	0,027
	3	0,5-0,8	0,13	0,078	0,047	0,035	0,029	0,024
	5	0,5-0,8	0,12	0,075	0,045	0,033	0,027	0,023
1,0	---	0,5	0,24	0,14	0,080	0,058	0,045	0,038
	---	0,8	0,22	0,13	0,076	0,055	0,043	0,036
2,0	1	0,5	0,40	0,22	0,12	0,086	0,067	0,055
	1	0,8	0,36	0,20	0,11	0,079	0,061	0,051
	3	0,5-0,8	0,44	0,25	0,14	0,098	0,076	0,063
	5	0,5-0,8	0,45	0,26	0,15	0,100	0,080	0,065
5,0	1	0,5	0,86	0,47	0,24	0,170	0,130	0,110
	1	0,8	0,74	0,39	0,21	0,140	0,110	0,089
	3	0,5-0,8	1,06	0,58	0,31	0,220	0,170	0,130
	5	0,5-0,8	1,11	0,63	0,34	0,230	0,180	0,150
10,0	1	0,5	1,63	0,85	0,45	0,30	0,230	0,180
	1	0,8	1,34	0,70	0,36	0,25	0,190	0,150
	3	0,5-0,8	2,11	1,14	0,60	0,41	0,310	0,250
	5	0,5-0,8	2,20	1,24	0,66	0,46	0,340	0,280

ρ_1 / ρ_2	$h_1, \text{ м}$	$t_0, \text{ м}$	B_0 при длине электрода $l, \text{ м}$				
			60	70	80	90	100
0,5	1	0,5	0,024	0,021	0,019	0,017	0,016
	1	0,8	0,023	0,021	0,019	0,017	0,016
	3	0,5-0,8	0,021	0,019	0,017	0,015	0,014
	5	0,5-0,8	0,020	0,018	0,016	0,015	0,013
1,0	---	0,5	0,032	0,028	0,025	0,023	0,021
	---	0,8	0,031	0,027	0,024	0,022	0,020
2,0	1	0,5	0,047	0,041	0,036	0,033	0,030
	1	0,8	0,043	0,038	0,033	0,030	0,028
	3	0,5-0,8	0,053	0,046	0,041	0,037	0,033
	5	0,5-0,8	0,056	0,049	0,043	0,039	0,035
5,0	1	0,5	0,089	0,076	0,067	0,060	0,054
	1	0,8	0,075	0,065	0,058	0,052	0,047
	3	0,5-0,8	0,110	0,098	0,086	0,077	0,069
	5	0,5-0,8	0,120	0,110	0,095	0,085	0,077
10,0	1	0,5	0,150	0,130	0,120	0,110	0,096
	1	0,8	0,130	0,110	0,098	0,086	0,078
	3	0,5-0,8	0,210	0,180	0,160	0,140	0,130
	5	0,5-0,8	0,240	0,200	0,180	0,160	0,140

Таблица П.9 – Относительное эквивалентное расчётное удельное сопротивление для горизонтальных сеток с вертикальными электродами

ρ_1/ρ_2

ρ_1/ρ_2	a/l_g	ρ_1/ρ_2 при относительной длине верхней части заземлителя $l_{отн}$						
		0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	0,95
0,125	0,5-2	0,95	0,90	0,80	0,70	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
1,0	1-4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2,0	1	1,02	1,03	1,05	1,10	1,13	1,30	1,40
	2	1,03	1,07	1,10	1,13	1,15	1,32	1,50
	4	1,05	1,17	1,13	1,15	1,20	1,38	1,60
5,0	1	1,05	1,10	1,15	1,22	1,35	1,86	2,40
	2	1,22	1,26	1,35	1,43	1,54	2,12	2,70
	4	1,33	1,41	1,50	1,65	1,83	2,60	3,50
10,0	1	1,10	1,20	1,28	1,38	1,62	2,50	3,70
	2	1,30	1,40	1,50	1,60	1,80	2,75	5,50
	4	1,52	1,70	1,88	2,08	2,33	3,52	6,60

Таблица П.10 – Приближённые значения удельных электрических сопротивлений различных грунтов и воды

Грунт, вода	Удельное сопротивление, Ом·м		Грунт, вода Возможные пределы колебаний	Удельное сопротивление, Ом·м	
	Возможные пределы колебаний	При влажности 10 - 20 % массы грунта		При влажности 10 - 20 % массы грунта	
Глина	8-70	40	Скалистый	10^4 - 10^7	---
Суглинок	40-150	100	Вода:		
Песок	400-700	700	- морская	0,2-1	---
Супесь	150-400	300	- речная	10-100	---
Торф	10-30	20	- прудовая	40-50	---
Чернозём	9-53	20	- грунтовая	20-70	---
Садовая земля	30-60	40	- в ручьях	10-60	---
Каменистый	500-800	---			

Таблица П.12 – Коэффициенты сезонности ψ для однородной земли

Климатическая зона по табл. 3.11	Влажность земли во время измерения её сопротивления			Климатическая зона по табл. 3.11	Влажность земли во время измерения её сопротивления		
	Повышенная	Нормальная	Малая		Повышенная	Нормальная	Малая
Вертикальный электрод длиной 3 м				Горизонтальный электрод длиной 10 м			
I	1,9	1,7	1,5	I	9,3	5,5	4,1
II	1,7	1,5	1,3	II	5,9	3,5	2,6
III	1,5	1,3	1,2	III	4,2	2,5	2,0
IV	1,3	1,1	1,0	IV	2,5	1,5	1,1
Вертикальный электрод длиной 5 м				Горизонтальный электрод длиной 50 м			
I	1,5	1,4	1,3	I	7,2	4,5	3,6
II	1,4	1,3	1,2	II	4,8	3,0	2,4
III	1,3	1,2	1,1	III	3,2	2,0	1,6
IV	1,2	1,1	1,0	IV	2,2	1,4	1,12
Примечание 1: Земля считается повышенной влажности , если измерению её сопротивления предшествовало выпадение большого количества (свыше нормы) осадков (дождей), нормальной (средней) влажности , если измерению предшествовало выпадение небольшого количества (близкое к норме) осадков, малой влажности , если земля сухая, а количество осадков в предшествующий измерению период было ниже нормы.							
Примечание 2: Заглубление электродов, то есть расстояние от поверхности земли до верхнего конца вертикального электрода и до горизонтального электрода равно 0,7 - 0,8 м							

Таблица П.13 – Коэффициенты сезонности ψ для слоя сезонных изменений в многослойной среде

Климатическая зона по табл. П.11	Условная толщина сезонных изменений h_c , м	Влажность земли во время измерения её сопротивления		
		Повышенная	Нормальная	Малая
I	2,2	7,0	4,0	2,7
II	2,0	5,0	2,7	1,9
III	1,8	4,0	2,0	1,5
IV	1,6	2,5	1,4	1,1
См. Примечание 1 к табл. П.12				

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Таблица 1 – Индивидуальное задание на расчёт к 1 части РГР

№	Размеры подстанции, мм	Сопротивление естественного заземлителя, Ом	Протяженность линий 6 кВ		Размеры вертикального электрода		Размеры горизонтального электрода, мм	Глубина заложения электродов, то м	Расстояние между вертикальными электродами, м
			КЛ, км	ВЛ, км	ℓ, м	D, мм			
1	18000x12000	15	65	50	3	10	4x40	0,5	6
2	15000x12000	10	55	65	3	10	4x40	0,6	3
3	20000 x12000	12	50	68	5	12	4x40	0,8	4
4	15000x10000	15	65	50	3	10	4x40	0,5	5
5	21000 x12000	12	50	60	4	12	4x40	0,7	3
6	15000x12000	15	65	52	3	10	4x40	0,9	3
7	21000x14000	10	60	50	4	12	4x40	0,5	7
8	16000x12000	14	45	50	3	12	4x40	0,8	4
9	15000 x12000	12	50	55	5	10	4x40	0,5	3
10	18000x12000	10	65	50	3	12	4x40	0,7	6
11	20000 x12000	10	45	60	5	10	4x40	0,5	4
12	21000x14000	14	65	50	3	12	4x40	0,5	7
13	15000x10000	12	55	65	3	12	4x40	0,6	5
14	20000 x10000	10	50	68	5	10	4x40	0,8	5
15	15000x12000	15	65	55	3	12	4x40	0,5	3
16	20000 x10000	12	50	60	4	10	4x40	0,7	5
17	15000x12000	15	65	50	3	12	4x40	0,9	3
18	21000x14000	10	60	50	4	10	4x40	0,5	7
19	16000x12000	14	45	50	3	12	4x40	0,8	4
20	15000 x12000	12	50	55	5	12	4x40	0,5	3
21	18000x12000	10	65	50	3	10	4x40	0,7	6
22	20000 x12000	10	45	67	5	12	4x40	0,5	4
23	12000x9000	14	65	50	4	10	4x40	0,5	3
24	15000x15000	12	55	65	3	10	4x40	0,8	3
25	16000x8000	10	50	68	4	12	4x40	0,5	4
26	15000x9000	14	65	50	3	12	4x40	0,7	3
27	20000 x12000	12	50	60	5	10	4x40	0,5	4
28	20000 x15000	10	65	52	3	12	4x40	0,7	5
29	21000x14000	10	64	53	5	10	4x40	0,6	7
30	16000x12000	14	67	50	3	12	4x40	0,8	4

Таблица 2 – Индивидуальное задание на расчёт 2 части РГР

№ вар	Размер ОРУ $L_x \times L_y$ (м)	Размер ЗРУ $L_x \times L_y$ (м)	Горизон- тальный электрод, (мм)	Верти- кальный электрод		Расчетное удельное сопротив- ление земли		Мощ- ность верх- него слоя земли, (м)	Расчетный ток замыкания на землю		
				ℓ , м	d, мм	ρ_1 , Ом·м	ρ_2 , Ом·м		110 кВ кА	35 кВ А	6 кВ А
1	90x60	30x20	4 × 40	3	10	175	60	2,4	3	35	20
2	88x58	30x20	4 × 40	4	12	180	65	2,5	4	40	25
3	86x56	30x20	4 × 40	5	10	185	70	2,6	5	45	30
4	84x54	30x20	4 × 40	3	12	190	75	2,7	3	35	20
5	82x52	30x20	4 × 40	4	10	195	80	2,8	4	40	25
6	80x50	30x20	4 × 40	5	12	200	85	2,4	5	45	30
7	78x48	30x20	4 × 40	3	10	205	60	2,5	3	35	20
8	76x46	30x20	4 × 40	4	12	210	65	2,6	4	40	25
9	74x44	30x20	4 × 40	5	10	215	70	2,7	5	45	30
10	72x42	30x20	4 × 40	3	12	220	75	2,8	3	35	20
11	70x40	30x20	4 × 40	4	10	225	80	2,4	4	40	25
12	90x60	30x20	4 × 40	5	12	230	85	2,5	5	45	30
13	88x58	30x20	4 × 40	3	10	175	60	2,6	3	35	20
14	86x56	30x20	4 × 40	4	12	180	65	2,7	4	40	25
15	84x54	30x20	4 × 40	5	10	185	70	2,8	5	45	30
16	82x52	30x20	4 × 40	3	12	190	75	2,4	3	35	20
17	80x50	30x20	4 × 40	4	10	195	80	2,5	4	40	25
18	78x48	30x20	4 × 40	5	12	200	85	2,6	5	45	30
19	76x46	30x20	4 × 40	3	10	205	60	2,7	3	35	20
20	74x44	30x20	4 × 40	4	12	210	65	2,8	4	40	25
21	72x42	30x20	4 × 40	5	10	215	70	2,4	5	45	30
22	70x40	30x20	4 × 40	3	12	220	75	2,5	3	35	20
23	90x60	30x20	4 × 40	4	10	225	80	2,6	4	40	25
24	88x58	30x20	4 × 40	5	12	230	85	2,7	5	45	30
25	86x56	30x20	4 × 40	3	10	175	60	2,8	3	35	20
26	84x54	30x20	4 × 40	4	12	180	65	2,4	4	40	25
27	82x52	30x20	4 × 40	5	10	185	70	2,5	5	45	30
28	80x50	30x20	4 × 40	3	12	190	75	2,6	3	35	20
29	78x48	30x20	4 × 40	4	10	195	80	2,7	4	40	25
30	76x46	30x20	4 × 40	5	12	200	85	2,8	5	45	30

ЛИТЕРАТУРА

1. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учебное пособие для вузов. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с., ил.
2. Маньков В. Д., Заграничный С. Ф. Защитное заземление и защитное зануление электроустановок: справочник. – СПб.: Политехника, 2005. – 400 с: ил.
3. Патрикеев Л.Я. Физические, параметрические и критериальные вопросы электробезопасности: метод. пособие. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2002. – 80 с.: ил.
4. Заземляющие устройства электроустановок: справочник / Борисов Р.К. и др. – М., МЭИ, 2013. – 360 с.: ил.
5. Долин П.А., Медведев В.Т., Корчков В.В. Электробезопасность: задачник: учебное пособие. – М.: Гарадарики, 2003. – 215 с.: ил.
6. Белявин К.Е. Электробезопасность при эксплуатации электроустановок: справочное пособие. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 195 с.

Учебное издание

**Крастелёв Олег Михайлович
Малюк Евгений Григорьевич**

РАСЧЁТ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ

*Учебно-методическое пособие
к расчётно-графической работе*

В авторской редакции

Изд. № 130/2025. Объем 4 п. л. Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,92.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»